

C. NOTICE TECHNIQUE


TERRASOL

TABLE DES FIGURES



TABLE DES TABLEAUX

C.1. Introduction et grands principes

C.1.1. Objet du calcul et champ d'application

K-Réa permet d'étudier le comportement des écrans de soutènement (efforts internes et déformations) soumis à une série de phases de construction.

La méthode de calcul utilisée est la méthode de calcul aux coefficients de réaction (de type MISS-K[1] par référence à la norme d'application de l'Eurocode 7, qui sera appelée dans ce document simplement MISS, par simplification). Elle est fondée sur la modélisation des soutènements par des éléments de poutre sur appuis élasto-plastiques.

K-Réa permet d'analyser deux types de projets :

- Projets « Ecran simple » : comprenant un unique soutènement plan ;

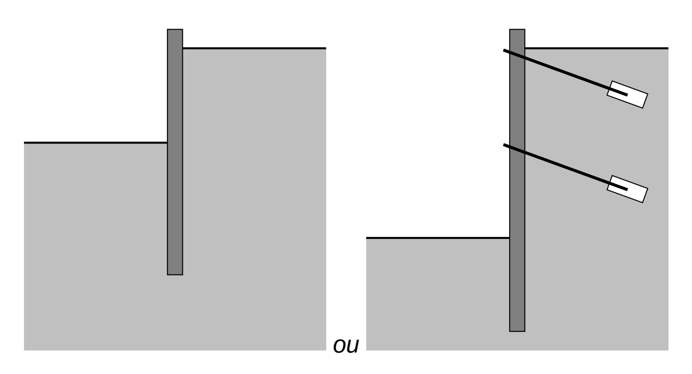


Figure C 1 : Exemples de projets « écran simple »

- Projets « Double-écran » : comprenant deux soutènements plans, liés ou non par une à deux nappes d'ancrages de liaison.

  Nota : on désigne par doubles-écrans dans ce manuel à la fois les doubles-écrans et les contre-écrans.

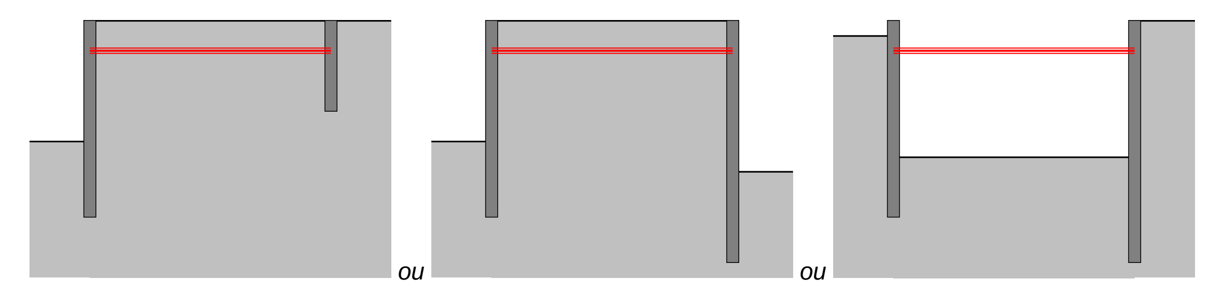


Figure C 2 : Exemples de projets « double écran »

La série des phases de construction comprend la phase initiale de mise en place du (ou des) mur(s) et est suivie de différentes phases correspondant chacune à un ensemble d'actions telles que la mise en place d'un buton ou d'un tirant, la variation d'un niveau de sol ou d'eau, l'application de surcharges ou la mise en place d'un ancrage de liaison (dans le cas d'un projet Double Ecran).

Le calcul de base MISS est présenté et détaillé dans les chapitres C.1.2.1 et C.2.

[1] MISS-K : Modèle d'Interaction Sol Structure basé sur la méthode des coefficients de réaction.



D'autre part, en complément du calcul MISS, K-Réa permet également d'effectuer, pour les écrans de type écran simple, 3 types de vérifications aux ELU selon la norme NF P 94-282, qui est la norme française d'application de l'Eurocode 7 pour les calculs des écrans de soutènement (cf chapitres C.1.2.2 et C.3).

L'articulation globale des différents types de calcul et vérifications est présentée sous la forme d'un organigramme dans le chapitre C.1.2.3.

C.1.2. Introduction aux méthodes de calcul et vérifications proposées

C.1.2.1. Présentation rapide de la méthode de calcul de base MISS

Pour un projet Ecran Simple, la méthode consiste en la constitution d'une matrice de rigidité correspondant aux éléments de poutre représentant la structure de l'écran, les ressorts modélisant le sol dans une phase élastique et les éléments de liaison extérieure. En phase élastique, les éléments correspondant au sol réagissent linéairement avec le déplacement jusqu'à atteindre soit un palier inférieur soit un palier supérieur, au-delà desquels la valeur de pression du sol est constante (seuil de plastification).

Pour un projet Double Ecran, la méthode consiste à étudier les 2 écrans de façon indépendante, selon la méthode présentée ci-dessus, en modélisant l'action de chaque ancrage de liaison sur chaque écran par une force (il est possible de modéliser au maximum deux ancrages de liaison). Un moteur d'itérations permet alors de trouver les déplacements imposés tels que les efforts aux points d'ancrage des ancrages de liaison sont équilibrés entre les deux écrans.

C.1.2.2. Présentation rapide des vérifications ELU selon la norme NF P 94-282

La norme NF P 94-282 représente le texte d'application de l'Eurocode 7 (NF EN 1997) au calcul des écrans de soutènement verticaux, que ces écrans soient auto-stables (écrans dits « en console ») ou réalisés avec des appuis (écrans dits « ancrés »).

Ce texte fixe le cadre des vérifications aux états limites ultimes (ELU) à mener vis-à-vis des principaux risques de ruine des écrans de soutènement :

- Vérification du défaut de butée des terrains (1) ;
- Vérification de la résistance de la structure de l'écran et de ses appuis (2) ;
- Vérification de l'équilibre vertical de l'écran (3) ;
- Vérification de la stabilité hydraulique (4) ;
- Vérification de la stabilité du massif d'ancrage (5) ;
- Vérification de la stabilité d'ensemble (6) ;

Le logiciel K-Réa offre la possibilité de mener, pour chaque phase d'un projet écran simple, les vérifications (1), (3) et (5) conformément à la norme NF P 94-282. Il fournit également les éléments nécessaires à la vérification (2). Les vérifications (4) et (6) doivent être menées à l'aide de programmes de calcul spécifiques.

L'approche générale du calcul est « l'approche 2 » de l'EN 1997-1 telle que précisée dans la norme NF P 94-282.

C.1.2.3. Articulation des différents types de calculs

La figure ci-dessous présente l'organigramme général des calculs effectués par K-Réa et leur articulation.

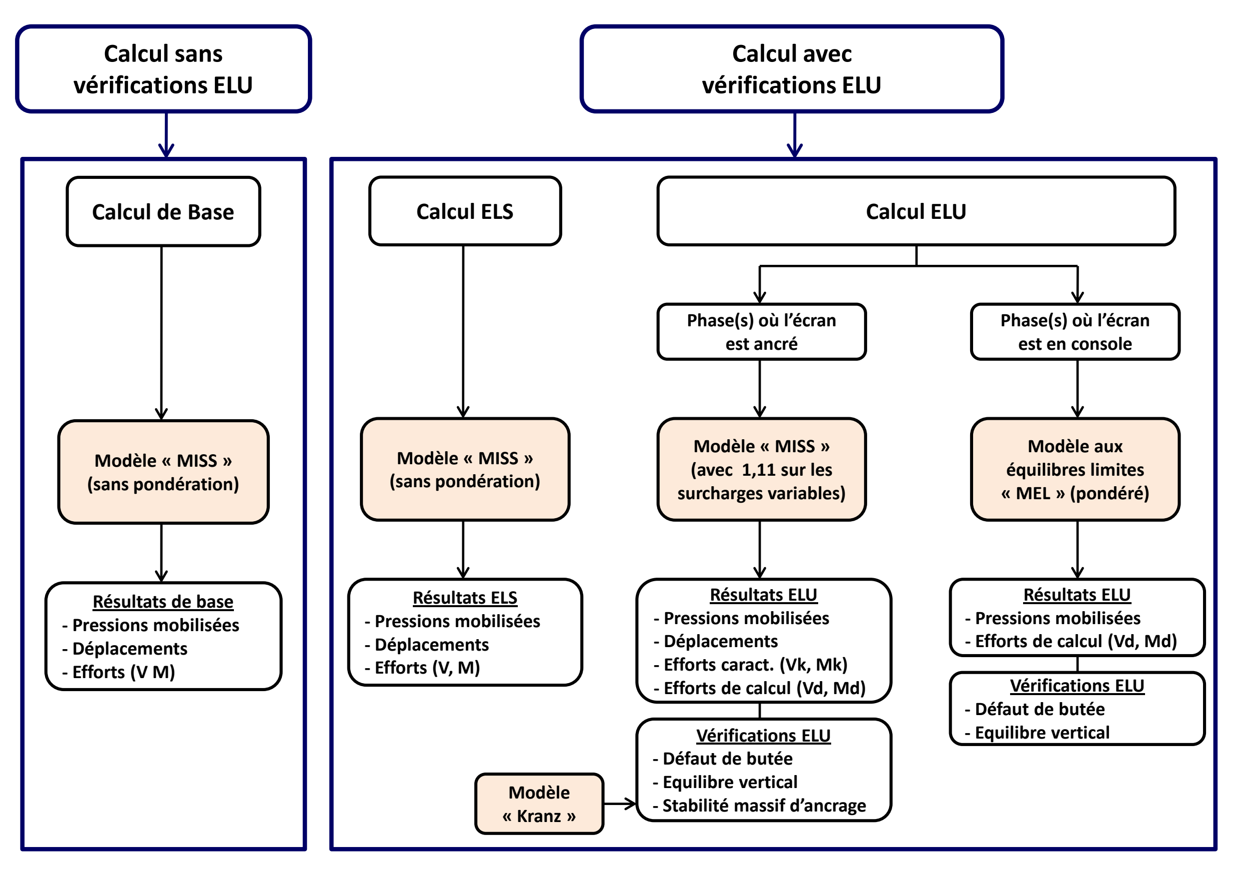


Figure C 3 : Organigramme de calcul

Dans le cas d'un calcul mené sans vérifications ELU, toutes les phases sont traitées à l'aide du modèle de « base » qui est un modèle aux déplacements basé sur la méthode des coefficients de réaction (modèle MISS K, dont il est rappelé qu'il est appelé MISS dans ce document par simplification), et réalisé sans pondération sur les caractéristiques des sols ni sur les surcharges. Les résultats obtenus comportent les déplacements de l'écran, les pressions mobilisées ainsi que les efforts de flexion et de cisaillement (V, M).

Dans le cas d'un calcul mené avec vérifications ELU, pour chaque phase, deux calculs sont réalisés :

1) <u>Un calcul « ELS »</u> basé sur un modèle MISS réalisé sans pondération sur les caractéristiques des sols et des surcharges. Les résultats de ce calcul sont strictement identiques à ceux d'un calcul « sans vérifications ELU » : déplacements, pressions mobilisées, et efforts (V, M) ;
2) <u>Un calcul « ELU »</u> dont le modèle diffère selon que l'écran est ancré ou non dans la phase considérée :
   - <u>*Si l'écran est ancré*</u> : le calcul est mené à l'aide d'un modèle MISS réalisé en appliquant un facteur de pondération « intermédiaire » de 1,11 sur les surcharges variables. Ce modèle conduit aux résultats suivants :
     - Déplacements ;
     - Valeurs caractéristiques des pressions mobilisées ;
     - Valeurs caractéristiques des efforts dans les appuis ;
     - Valeurs caractéristiques des efforts (Vk, Mk) ;



   - Valeurs de calcul des efforts (Vd, Md) évalués en appliquant un facteur de 1,35 sur les valeurs caractéristiques.

  Les résultats de ce modèle servent de paramètres d'entrée pour la réalisation des vérifications ELU suivantes ;

   - Vérification du défaut de butée ;
   - Vérification de la résultante verticale ;
   - Vérification de la stabilité du massif d'ancrage.

- *Si l'écran est en console* (auto stable) : le calcul est mené à l'aide d'un modèle aux équilibres limites (MEL) conformément aux dispositions de la norme NF P 94-282. Ce modèle est réalisé en appliquant des facteurs de pondérations partielles sur les actions (poussées, eau, surcharges…) et sur les résistances (butées, contre butée…). Il conduit aux résultats suivants :
   - Valeurs de calcul des pressions mobilisées ;
   - Valeurs de calcul des efforts (Vd, Md).

  Ces résultats sont accompagnés des vérifications suivantes :

   - Vérification du défaut de butée ;
   - Vérification de la résultante verticale.

C.1.3. Conventions de signes

Pour chaque écran, le sol est découpé verticalement en côté gauche, situé à gauche de l'écran et en côté droit, situé à droite. Les déplacements de l'écran et les efforts sont positifs vers la droite (cf Figure C 4).
Nota : l'excavation « principale » peut se situer indifféremment côté gauche ou côté droit.

Les ordonnées sont soit positives vers le haut lorsqu'elles servent à définir des **cotes**, soit positives vers le bas lorsqu'elles servent à définir des **profondeurs**. L'option est définie dans le **Menu Données**, **Titres et Options**.

Pour les efforts extérieurs à l'écran, les forces (représentées par F sur la figure ci-dessous) sont positives lorsqu'elles sont orientées de la gauche vers la droite et les couples (représentés par M sur la figure ci-dessous) sont positifs s'ils tournent dans le sens trigonométrique direct.

Les efforts des ancrages (tirants et butons) exercés sur l'écran sont positifs lorsqu'ils sont orientés de la gauche vers la droite. Dans le cas des doubles-écrans, l'effort d'un ancrage de liaison agissant en traction est positif pour l'écran de gauche et négatif pour l'écran de droite ; et réciproquement pour un ancrage de liaison agissant en compression.

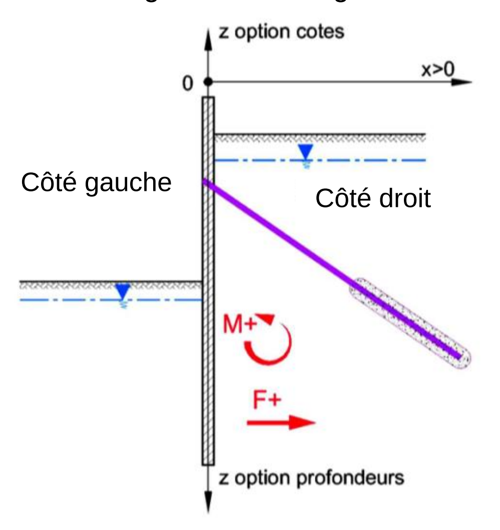


Figure C 4 : Conventions de signe

Par ailleurs, pour ce qui concerne les efforts internes (M, V et N), la figure ci-dessous présente la convention de signe retenue dans K-Réa. L'effort axial N est pris positif en compression.

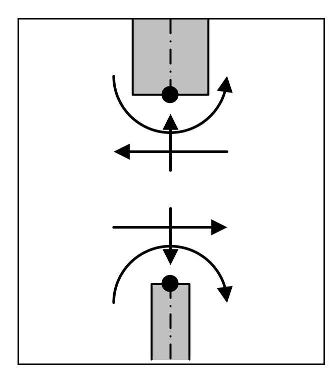


Figure C 5 : Convention de signe pour les efforts internes



C.2. Méthode de calcul de base MISS

C.2.1. Projet Simple Ecran

Ce chapitre traite des projets composés d'un seul écran, qu'il soit ancré ou en console (Figure C 1).

C.2.1.1. Introduction

Il s'agit de calculer les efforts internes et les déformations de l'écran de soutènement lors des différentes phases d'excavation, ainsi que les efforts externes représentés d'une part par les réactions du sol, et d'autre part par les liaisons externes. L'écran, de hauteur prédéterminée, est supposé de longueur infinie de telle sorte que l'analyse du sol est faite en déformations planes.
Quel que soit le type d'écran choisi, l'écran peut être soumis aux sollicitations suivantes :

- Poussées du sol et de l'eau ;
- Surcharges horizontales sur l'écran ;
- Efforts de butons, tirants ou ancrages de liaison (dans le cas d'un projet Double Ecran) ;
- Moment additionnel imposé ;
- Couple résultant d'un encastrement avec une structure extérieure.

L'action du sol et de l'eau sur l'écran est représentée par des pressions horizontales s'appliquant à gauche et à droite de l'écran. Les pressions du sol sont liées au déplacement horizontal de l'écran par l'intermédiaire d'une loi de comportement élasto-plastique caractérisée par les paramètres de la couche de sol intéressée et par la contrainte verticale dans le sol qui dépend du niveau d'excavation, de la pression d'eau et des surcharges éventuelles.

C.2.1.2. Raideur (produit d'inertie) de l'écran

L'écran peut être soit homogène (c'est-à-dire ayant une raideur constante sur toute sa hauteur, de la base à la tête), soit composé de plusieurs sections de raideurs différentes. De plus, l'utilisateur peut faire varier la raideur de chaque section pendant le phasage.
La raideur est pour chaque section définie par le produit $E.I$, où :

- E : module de Young
- I : inertie de l'écran

Un assistant est disponible dans K-Réa pour la détermination du produit EI en fonction du type d'écran et de ses caractéristiques (voir chapitre B.3.3.2).

C.2.1.3. Loi de comportement du sol

Dans une phase de calcul donnée, la loi de comportement du sol est définie, à tout niveau, et pour chacun des deux côtés, par la connaissance des paramètres suivants :

- k_h : coefficient de réaction horizontal ;
- p_a : pression limite de poussée horizontale (ou poussée active) ;
- p_p : pression limite de butée horizontale (ou poussée passive) ;
- p_i : pression de référence horizontale pour le déplacement nul ;
- x : déplacement horizontal, positif vers le côté droit.

La courbe liant la pression horizontale p au déplacement x est constituée d'une partie linéaire caractérisée par une droite de pente k_h et d'ordonnée à l'origine p_i et de deux paliers horizontaux de plasticité p_a et p_p disposés de la manière suivante :

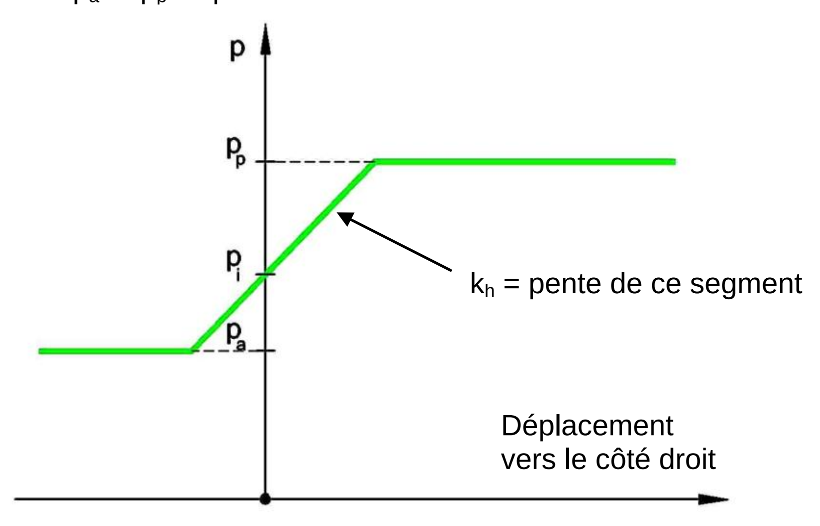


Figure C 6 : Loi de comportement du sol

Le coefficient de réaction k_h au niveau considéré découle de deux paramètres fixés pour chaque couche de sol, à savoir la valeur du coefficient en tête de la couche et sa variation avec la profondeur.

Les valeurs des paliers de plasticité p_a et p_p découlent des paramètres suivants caractérisant chaque couche de sol :

- γ : poids volumique humide ;
- γ_d : poids volumique déjaugé ;
- φ : angle de frottement ;
- c : cohésion ;
- k_0 : coefficient de poussée au repos ;
- $k_{a\gamma}$: coefficient de poussée active horizontale ;
- $k_{p\gamma}$: coefficient de poussée passive horizontale ;
- k_{ac} : coefficient de poussée appliqué à la cohésion c ;
- k_{pc} : coefficient de butée appliqué à la cohésion c ;
- σ'_v : contrainte verticale effective du sol.

et sont calculées par le programme comme suit :

- $p_a = k_{a\gamma}.\sigma'_v - k_{ac}.c$ (où $p_a = 0$ si $k_{a\gamma}.\sigma'_v - k_{ac}.c < 0$)
- $p_p = k_{p\gamma}.\sigma'_v + k_{pc}.c$



La contrainte verticale effective σ_v' est calculée par le programme à partir des poids volumiques γ et γ_d, des niveaux de sol, de la pression d'eau et des surcharges éventuelles.

La pression initiale p_i pour un déplacement nul fait appel, dans l'état initial du sol, à la notion de poussée au repos caractérisée par le coefficient de poussée au repos k_0 affecté à la couche de sol considérée, auquel cas :

$p_i = k_0.\sigma'_{v0}$ avec σ'_{v0} = contrainte effective verticale au repos

Dans une phase d'excavation, la pression initiale p_i pour un déplacement nul peut être modifiée concomitamment par deux phénomènes :

- la plastification du sol dans la ou les phases précédentes
- la modification de la pression verticale effective σ'_v

En fait, la plastification du sol dans une phase particulière a pour effet, dans la phase suivante, de décaler horizontalement la courbe reliant la pression du sol au déplacement horizontal de la valeur du déplacement sur le palier de plasticité de la manière suivante :

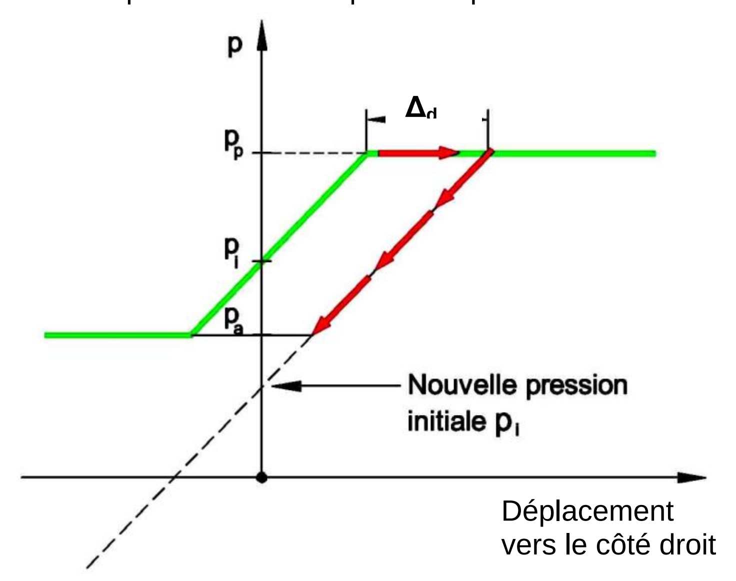


Figure C 7 : Plastification du sol

Cas particulier du décollement : la droite de retour est inchangée et donc la pression initiale est inchangée également.

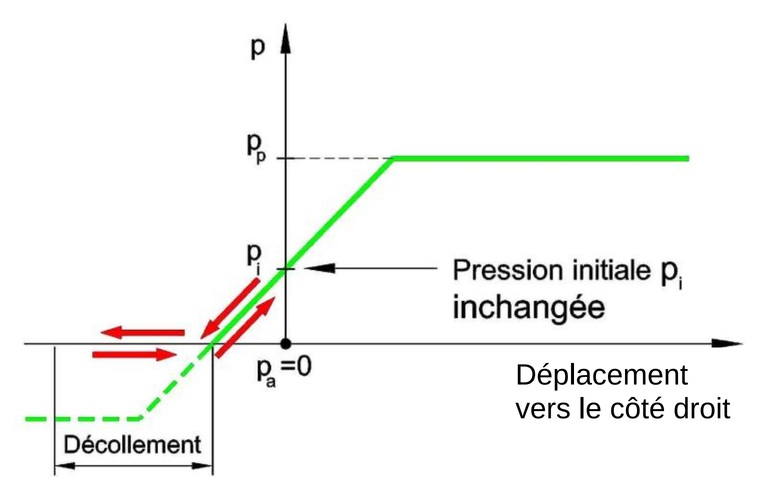


Figure C 8 : Cas particulier du décollement du sol

La modification de la contrainte verticale effective du sol dans une phase donnée a comme conséquence le double effet suivant :

- premièrement, de décaler la valeur de la pression p_i pour un déplacement nul soit vers le bas pour un déchargement, soit vers le haut pour un chargement et,
- deuxièmement, de réactualiser la valeur des deux paliers de plasticité, de la manière suivante :

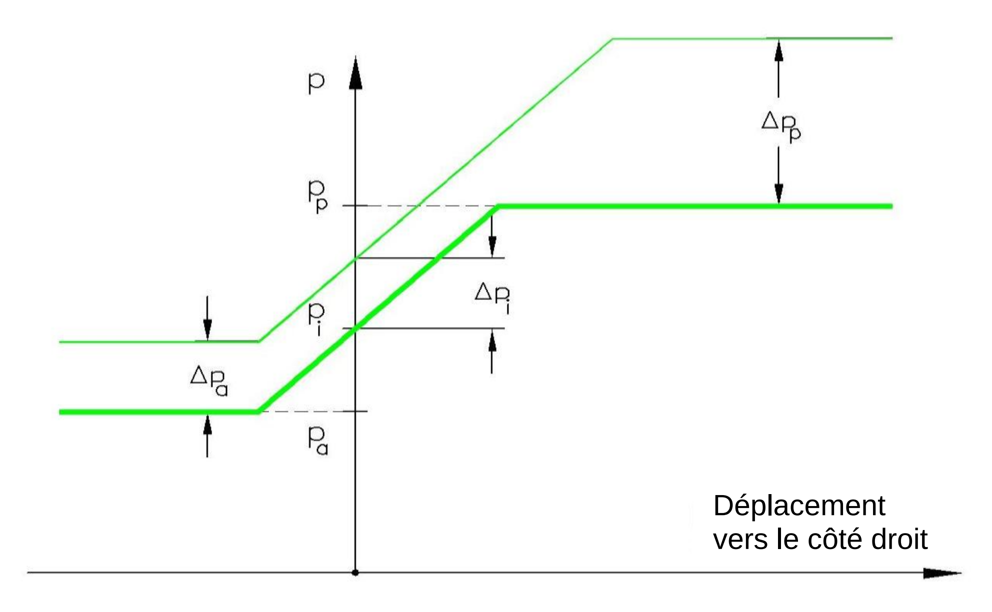


Figure C 9 : Modification de la contrainte verticale effective

Si $\Delta\sigma'_v$ est l'accroissement de la contrainte verticale effective, le décalage de la pression initiale Δp_i vaut :

- $\Delta p_i = k_r.\Delta\sigma'_v$ si $\Delta\sigma'_v > 0$ avec k_r = coefficient de recompression
- $\Delta p_i = k_d.\Delta\sigma'_v$ si $\Delta\sigma'_v < 0$ avec k_d = coefficient de décompression

Les paliers de plasticité p_a et p_p sont calculés à partir de la nouvelle valeur de σ'_v de la même manière que précédemment.

C.2.1.4. Prise en compte du flambement (effets de second ordre)

Il est possible de prendre en compte dans les calculs les effets de second ordre dans l'écran (sur la base des valeurs caractéristiques, par opposition aux valeurs de calcul, et en supposant un terrain naturel horizontal). Cela consiste à tenir compte des efforts complémentaires (moments et efforts tranchants) amenés par l'effort axial N(z) dans l'écran. Celui-ci est calculé en prenant en compte les composantes verticales des charges linéaires et des efforts dans les tirants.

A cet effort axial N(z), correspond un moment fléchissant et un effort tranchant complémentaires du second ordre dépendant directement de l'excentrement e(z) de la charge à une cote donnée (z) :

$$\frac{dM(z)}{dz} = N(z)\frac{de(z)}{dz} \qquad V(z) = -N(z)\frac{de(z)}{dz}$$

C.2.1.5. Organigramme

Les organigrammes de fonctionnement du moteur de calcul sont présentés sur les figures ci-dessous.

Figure C 10 : Organigramme de fonctionnement du moteur de calcul

Le sous programme de calcul fonctionne de la manière suivante :

Figure C 11 : Fonctionnement du sous-programme de calcul

En général, la convergence est obtenue au bout de 3 ou 4 itérations.



C.2.2. Projet Double Ecran

Cette partie traite des doubles-écrans constitués d'un écran principal ancré sur un écran d'ancrage, ou de deux écrans parallèles (batardeau ou tranchée ouverte) reliés par une ou deux nappes de tirants ou de butons (Figure C 2).
Comme expliqué dans le chapitre C.1.2, dans un projet Double Ecran, chaque écran est étudié de la même façon que l'écran d'un projet Ecran Simple. Les données présentées au chapitre C.2.1 Projet Ecran Simple restent donc valables.

C.2.2.1. Principe général

L'action des ancrages de liaison (qui peuvent être au maximum deux) est modélisée par une force extérieure (une force par ancrage, pour chaque écran). L'objectif de l'étude est de trouver une situation pour laquelle les efforts aux points d'ancrage sont équilibrés entre les deux écrans, situation atteinte grâce à un processus itératif dont le critère de convergence porte sur les efforts dans chaque ancrage.

Ce principe est illustré sur la figure ci-dessous, et détaillé pour sa formulation dans le chapitre suivant.

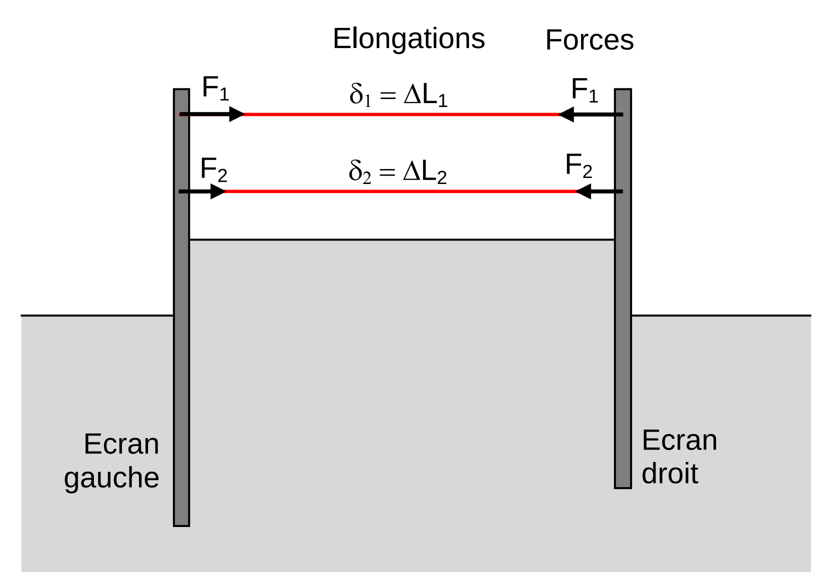


Figure C 12 : Principe du calcul des doubles-écrans

On note, pour l'ancrage « i » :

- y_i : déplacement « absolu » de l'écran gauche au niveau du point « jonction » avec l'ancrage « i » ;
- y'_i : déplacement « absolu » de l'écran droit au niveau du point « jonction » avec l'ancrage « i » ;

L'équilibre statique du système est caractérisé par les systèmes matriciels suivants :

- Ecran principal : $\begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \rho_1 & \rho_2 \\ \rho_2 & \rho_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix}$

- Contre-écran : $\begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \rho'_1 & \rho'_2 \\ \rho'_2 & \rho'_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y'_1 \\ y'_2 \end{bmatrix}$

- Ancrages : $\begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_1 & 0 \\ 0 & K_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 - y'_1 \\ y_2 - y'_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_1 & 0 \\ 0 & K_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \end{bmatrix}$

C.2.2.2. Formulation

L'ensemble des structures définissant un double- ou contre-écran est considéré comme un assemblage des systèmes mécaniques simples suivants, réduits, pour chaque itération, à des matrices de rigidité reliant les efforts appliqués au niveau des têtes des ancrages aux déplacements de ces mêmes têtes :

- Ecran de gauche, réduit pour la liaison à 1 ressort simple (matrice 1x1) ou 2 ressorts interactifs (matrice 2x2) correspondant à la tête ou aux deux têtes des ancrages ;
- Ecran de droite, réduit pour la liaison à 1 ou 2 ressorts interactifs (matrice 2x2) correspondant à la tête ou aux deux têtes des ancrages ;
- Ancrages : matrice diagonale composées des raideurs des ancrages

Ceci suppose que l'utilisateur a défini dans l'interface utilisateurs un écran gauche (appelé écran 1) et un écran droit (appelé écran 2). En règle générale, il est recommandé de définir pour l'écran 1 l'écran le plus long.

Les matrices unitaires sont assemblées dans un système matriciel global reliant les efforts engendrés par les actions imposées dans chaque phase et ramenés aux têtes des ancrages, et les déplacements des mêmes têtes d'ancrages.

Les écrans ne se comportant ni de manière élastique linéaire (du fait de la présence des sols, dont le comportement est élasto-plastique) ni de manière symétrique (du fait des conditions de sol ou d'actions différentes), on résout le problème de manière itérative pour chaque phase (voir aussi l'organigramme détaillé du chapitre C.2.2.3).

C.2.2.3. Organigramme

Les organigrammes de fonctionnement du moteur de calcul sont présentés sur les figures ci-dessous.

R1
Initialisation SR

R2
Initialisation SR

Initialisation globale

I_phase = i

R1
Déplacements unitaires au niveau des têtes des ancrages

R2
Déplacements unitaires au niveau des têtes des ancrages

R1
Estimation de la matrice de rigidité

R2
Estimation de la matrice de rigidité

Initialisation phase

I_phase ++

Résolution du système initial

Matrice de rigidité d'ensemble

Pour chaque phase

N_Déplacements initiaux = n

R1
Noyau itératif SR

R2
Noyau itératif SR

N_Déplacements initiaux++

Efforts pour équilibrer le système
Test compression/traction si

Noyau itératif Double Rideau

Non

Critère de convergence respecté

Oui

Phasage terminé

Non

Oui

Fin

Figure C 13 : Organigramme de fonctionnement du calcul Double Ecran

C.2.2.4. Champ d'application et limitations

C.2.2.4.1. Interaction entre les 2 écrans

Comme indiqué précédemment, le calcul K-Réa des doubles-écrans considère comme seule interaction entre les 2 écrans les ancrages de liaison s'ils existent.

K-Réa ne prend donc en compte aucune interaction entre les 2 écrans au travers du massif de sol entre les 2 écrans. En particulier, K-Réa ne procède à aucune vérification de « chevauchement » des coins de poussée/butée associés à chaque écran, ou d'interaction entre les coins de poussée/butée générés par l'un des écrans avec l'autre écran (cf figure ci-dessous).

Ces interactions doivent donc être vérifiées par ailleurs par l'utilisateur.

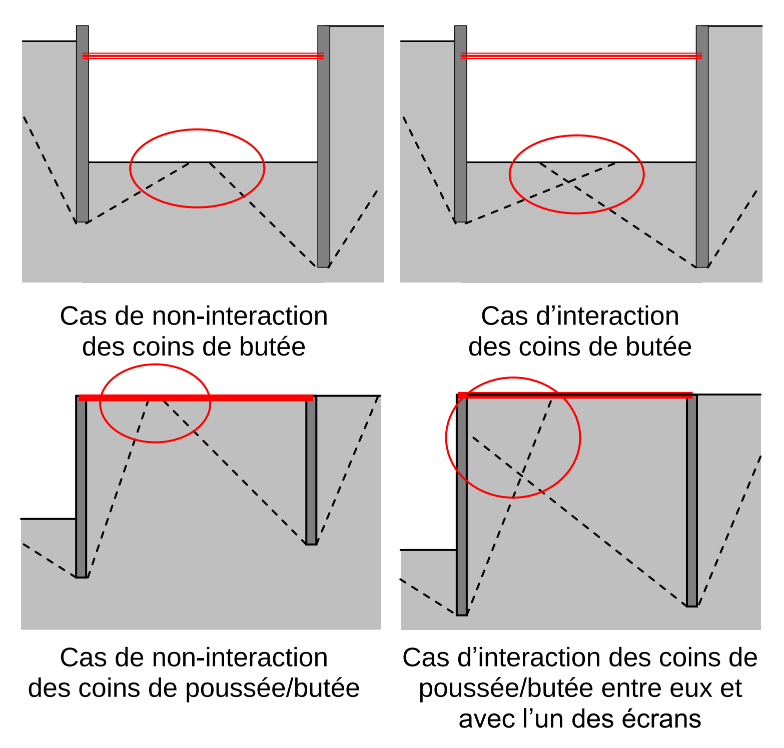


Figure C 14 : Schéma de principe d'interaction entre les 2 écrans

C.2.2.4.2. Vérifications ELU

Les vérifications ELU selon la norme NF P 94-282 ne sont disponibles que pour les simples-écrans. Dans le cas des doubles-écrans, pour effectuer ces vérifications ELU, la méthodologie à suivre est la suivante :

- Calcul du double-écran selon la méthode décrite précédemment
- « Séparation » du double-écran en 2 fichiers simples-écrans : le double-écran peut en effet être converti (après enregistrement automatique sous un nouveau nom) en écran simple (K-Réa demande alors lequel des 2 écrans conserver dans le nouveau projet écran simple). L'opération doit être menée 2 fois (une fois pour chacun des 2 écrans).



- Pour chacun des écrans simples :
  - activation des vérifications et définition des coefficients partiels et des données nécessaires pour les vérifications (nature des actions, phases MEL, etc)
  - définition d'une force linéaire au niveau de la cote de la tête de chaque ancrage de liaison, avec la valeur correspondant à l'effort dans chaque ancrage de liaison résultant du calcul double-écran (attention à la définir avec le bon signe, correspondant à une compression ou une traction dans l'ancrage selon le résultat du calcul double-écran)
  - lancement des calculs et exploitation des résultats des vérifications

Cette procédure est illustrée dans le tutoriel 6 de la partie D du manuel.

C.3. Vérifications ELU selon la norme NF P 94–282

Rappel : les vérifications ELU selon la norme NF P 94-282 sont proposées dans K-Réa **pour les écrans simples**. Elles ne sont pas disponibles pour les doubles-écrans. L'articulation de ces vérifications avec les calculs MISS est explicitée en détail au chapitre C.1.2.3. Voir en particulier l'organigramme de la Figure C 3.

C.3.1. Vérification du défaut de butée

C.3.1.1. Principe général

Conformément aux dispositions de la norme NF P 94-282, l'examen du défaut de butée est basé sur :

- Les résultats d'un modèle de calcul « MISS » avec application d'un facteur de 1,11 sur les surcharges variables, pour les phases où l'écran est « ancré » (présence d'un ou plusieurs éléments d'ancrage). Dans ce cas, il s'agit de vérifier que la butée mobilisée demeure inférieure, avec une sécurité suffisante, à la butée limite (ou disponible).

- Les résultats d'un modèle d'équilibre limite (dit modèle « MEL »), pour les phases où l'écran est « en console », où il s'agit de vérifier que la fiche disponible est supérieure, avec une sécurité suffisante, à la fiche minimale nécessaire à l'équilibre des moments et des efforts.

C.3.1.2. Phases où l'écran est ancré

Pour les phases où l'écran est ancré, la vérification du défaut de butée consiste à vérifier l'inégalité suivante :

$$B_{t,d} \leq B_{m,d}$$

Où :

- $B_{t,d}$: valeur de calcul de la résultante de la butée mobilisée ;
- $B_{m,d}$: valeur de calcul de la résultante de la butée limite (ou mobilisable) ;

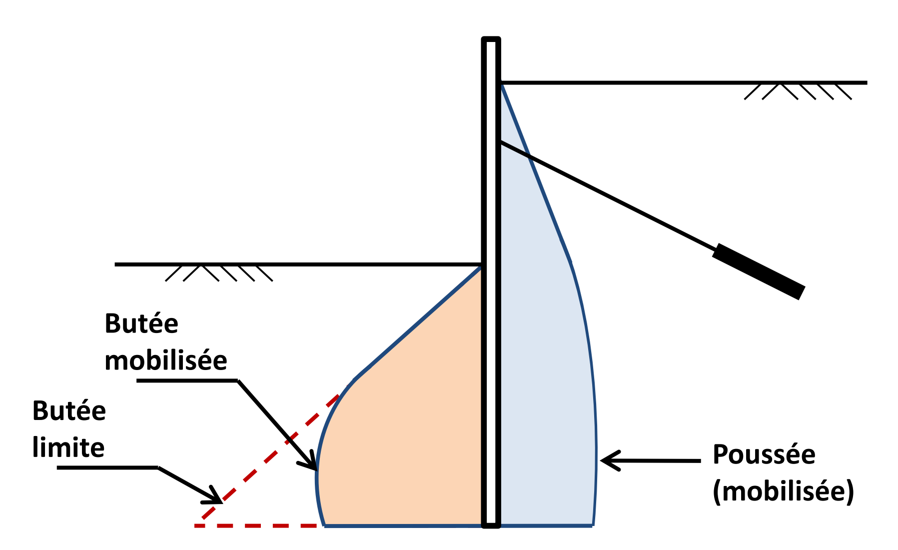


Figure C 15 : Butées mobilisée et limite pour le modèle d'équilibre d'un écran ancré



Les valeurs de calcul des butées mobilisée et mobilisable sont définies à partir des relations suivantes :

$$B_{t,d} = \gamma_a . B_{t,k} \qquad B_{m,d} = \frac{B_{m,k}}{\gamma_b}$$

Où :

- $B_{t,k}$: valeur caractéristique de la résultante de la butée mobilisée sur la face aval de l'écran et nécessaire à son équilibre ;
- $B_{m,k}$: valeur caractéristique de la résultante de la butée limite sur la face aval de l'écran ;
- Les coefficients γ_a et γ_b dépendent de la nature de la phase examinée et son précisés dans le tableau ci-dessous :

Nature de la phase	γ_a	γ_b
Provisoire	1,35	1,10
Définitive	1,35	1,40

Tableau C 1 : Coefficients de pondération γ_a et γ_b

Les valeurs caractéristiques des butées mobilisée et limite sont obtenues à l'aide d'un calcul de type « MISS » (aux coefficients de réaction) mené sans pondération des caractéristiques du sol (approche 2), et en appliquant un coefficient de pondération «$\gamma_{q,1}$» sur les valeurs caractéristiques des surcharges appliquées sur le terrain et celles appliquées sur l'écran. Les valeurs de $\gamma_{q,1}$ sont fonction de la nature de la surcharge appliquée et sont précisées dans le tableau ci-dessous :

Nature de la surcharge	Favorable	Défavorable
Permanente	1,00	1,00
Variable	0,00	1,11 (*)

Tableau C 2 : Coefficients de pondération $\gamma_{q,1}$ appliqués sur les surcharges

(*) : le coefficient 1,11 correspond au ratio 1,50 / 1,35 (pondération applicable aux actions variables / pondération applicable aux actions permanentes). Il est appliqué en conformité avec la norme NF P 94-282.

C.3.1.3. Phases où l'écran est en console

C.3.1.3.1. Principe général

La norme NF P 94-282 impose l'utilisation du modèle d'équilibre limite (MEL) pour le calcul ELU des phases où l'écran est en console.

Ce modèle consiste, comme son nom l'indique, à examiner l'équilibre de l'écran, supposé parfaitement rigide (le calcul ne tient implicitement pas compte de la flexibilité propre de l'écran) en considérant que le sol des deux côtés de l'écran est à l'état limite de poussée/butée jusqu'à un certain point dit « point de transition ». Au-delà de celui-ci, le sol est supposé en état limite de contre-poussée à l'aval de l'écran, tandis qu'à l'amont, on s'assure que la contre-butée nécessaire à l'équilibre horizontal de l'écran est inférieure, avec une sécurité suffisante, à la contre-butée disponible sous le point de transition (voir Figure C 16).

La définition du « point de transition » fait l'objet des paragraphes C.3.1.3.3 et C.3.1.3.4 de ce chapitre.

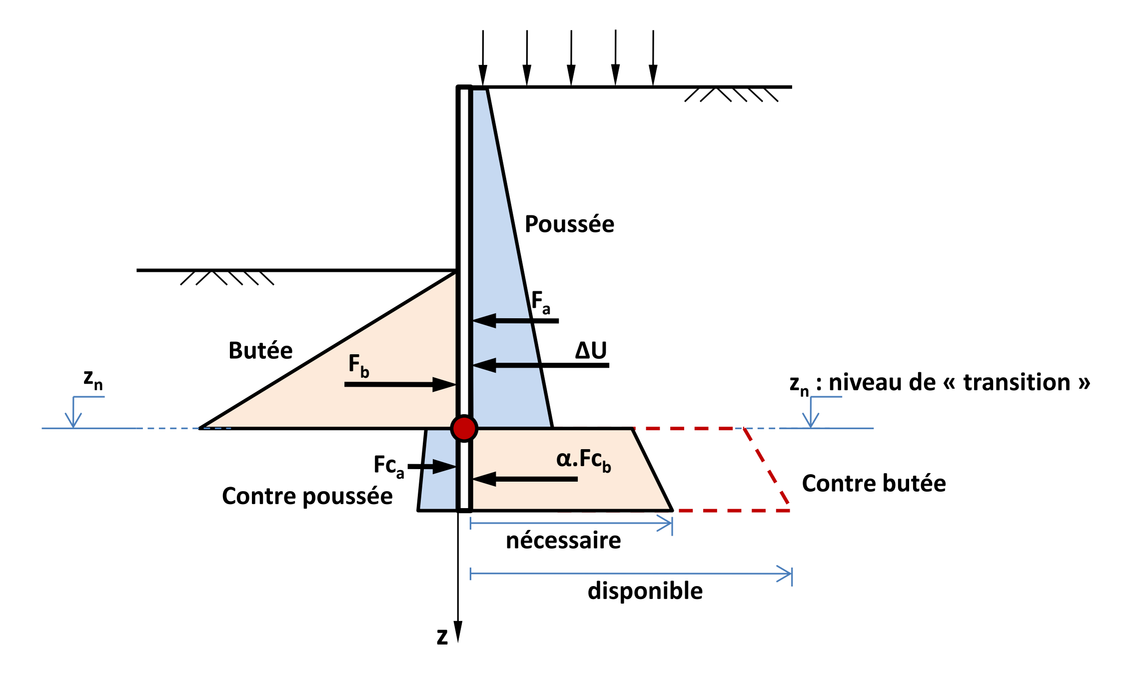


Figure C 16 : Principe conventionnel du modèle d'équilibre limite (MEL)

Avec les notations de la Figure C 16, l'équilibre de l'écran fait intervenir le système des efforts suivants :

- F_a : résultante horizontale du diagramme de poussée $p_{a,d}$
- F_b : résultante horizontale du diagramme de butée $p_{b,d}$
- Fc_a : résultante horizontale du diagramme de contre-poussée $pc_{a,d}$
- Fc_b : résultante horizontale du diagramme de contre-butée <u>disponible</u> $pc_{b,d}$
- ΔU : résultante horizontale du diagramme de pressions différentielles d'eau $u_a - u_b$

Le facteur « α » est appelé facteur de « mobilisation » de la contre butée et est défini comme le rapport entre la contre-butée nécessaire à l'équilibre horizontal de l'écran et celle disponible (ou limite).

Les diagrammes de pressions introduits ci-dessus sont exprimés en « valeurs de calcul » selon le système de pondération suivant :

- Pour la poussée (p_a) et la contre-poussée (pc_a), les valeurs de calcul sont prises égales aux produits des valeurs caractéristiques par le coefficient γ_a (Tableau C 1), soient :

$$p_{a,d} = \gamma_a . p_{a,k} \qquad pc_{a,d} = \gamma_a . pc_{a,k}$$

- Pour la butée (p_b) et la contre butée (pc_b), les valeurs de calcul sont prises égales aux produits des valeurs caractéristiques par $1/\gamma_b$ (Tableau C 1), soient :

$$p_{b,d} = \frac{p_{b,k}}{\gamma_b} \qquad pc_{b,d} = \frac{pc_{b,k}}{\gamma_b}$$

- Pour les pressions d'eau appliquées à l'amont (u_a) et à l'aval (u_b) de l'écran, on applique un coefficient γ_e = 1,35 sur la pression différentielle correspondante (u_a-u_b).



L'équilibre limite de l'écran prend également en compte les surcharges appliquées directement sur l'écran (force linéique, couple, surcharge trapézoïdale), dont les valeurs de calcul sont obtenues en appliquant sur les valeurs caractéristiques le coefficient de pondération $\gamma_{q,2}$ précisé dans le tableau ci-après :

Nature de la surcharge	Favorable	Défavorable
Permanente	1,00	1,35
Variable	0,00	1,50

Tableau C 3 : Coefficients de pondération $\gamma_{q,2}$ appliqués sur les surcharges

Sur la base de ce modèle, et selon les dispositions de la norme NF P 94-282, on justifie la stabilité vis-à-vis du défaut de butée en opérant les vérifications suivantes :

- Vérification de la fiche, qui consiste à s'assurer que la fiche disponible est supérieure, avec une sécurité suffisante, à la fiche minimale nécessaire à l'équilibre des moments.

- Vérification de la contre-butée, qui consiste à s'assurer que la contre-butée disponible sous le point de transition est suffisante pour équilibrer les efforts horizontaux. La mise en œuvre de cette vérification nécessite de déterminer la position du point de transition. Pour cela, deux approches de calcul sont proposées dans K-Réa :

  - Approche F, qui consiste à fixer le choix du point de transition à celui obtenu pour l'équilibre des moments lors de la vérification de la fiche (hypothèse sécuritaire vis-à-vis de la contre-butée et de l'effort tranchant) ;

  - Approche D, qui consiste à rechercher rigoureusement le point de transition Z_N afin d'assurer l'équilibre global à la fois des efforts et des moments.

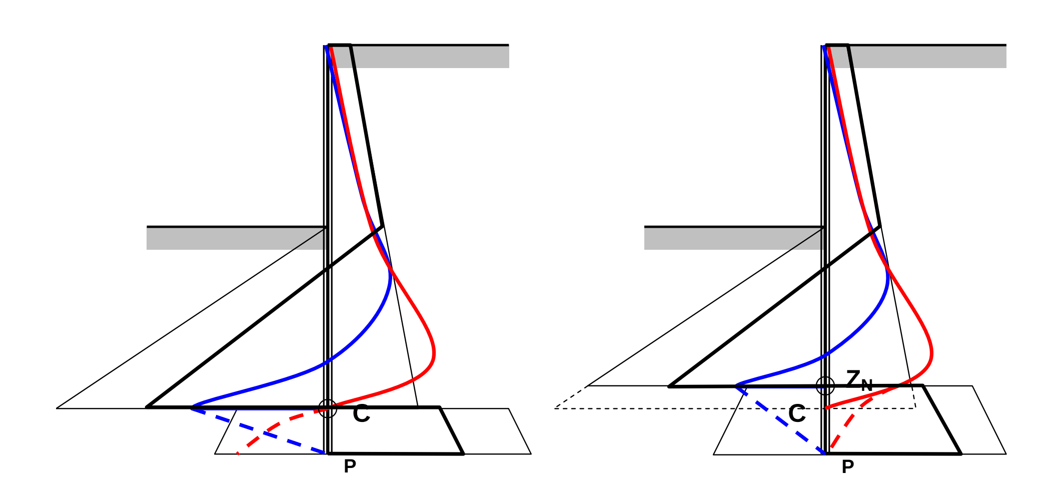


Figure C 17 : Approche (F) versus Approche (D)

C.3.1.3.2. Vérification de la fiche

La vérification de la fiche de l'écran est basée sur la condition suivante (figure ci-dessous) :

$$f_b \geq 1{,}20\, f_0$$

Où :

- f_b : fiche de l'écran « disponible » sous le point de pression différentielle nulle O ;
- f_0 : fiche minimale, sous le point de pression différentielle nulle O, nécessaire à l'obtention de l'équilibre des moments (au-dessus du point C) ;

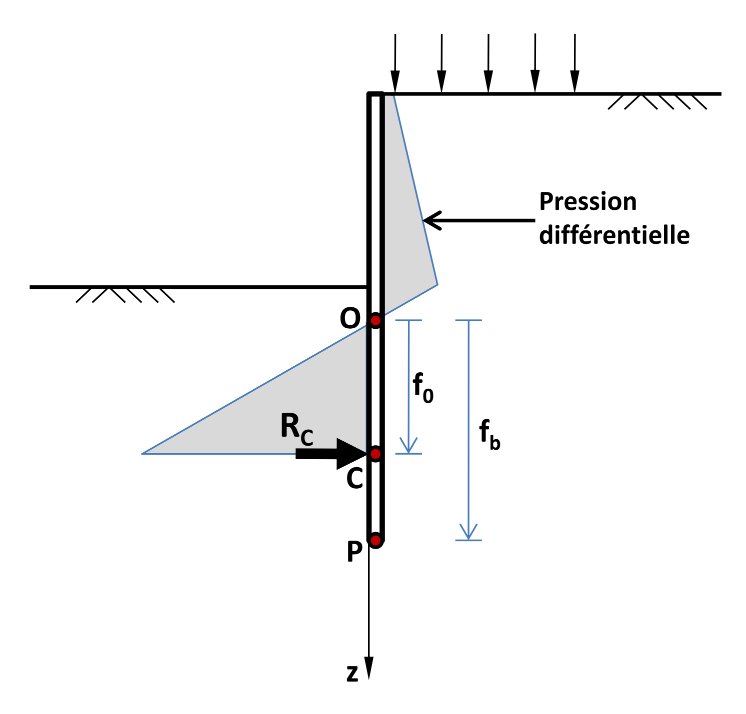


Figure C 18 : Notions de fiches minimale f_0 et disponible f_b selon le modèle MEL

Selon les notations de la figure ci-dessus, on a : $f_b = (z_P - z_O)$ et $f_0 = (z_C - z_O)$.

La pression différentielle ainsi évoquée, notée p_d, désigne le diagramme résultant obtenu en superposant les valeurs de calcul des diagrammes de poussée, de butée et de pressions d'eau. On a donc, par définition et avec les notations du chapitre C.3.1.3.1 :

$$p_d = p_{a,d} - p_{b,d} + u_a - u_b$$

La recherche du point C est menée en écrivant l'équation générale traduisant l'équilibre des moments par rapport à ce même point :

$$M(p_d)|_C + M(S_d)|_C = 0$$

Où :

- $M(p_d)|_C$: moment par rapport au point C, de la résultante du diagramme de pressions différentielles p_d sur la hauteur comprise entre la tête de l'écran et le point C ;
- $M(S_d)|_C$: moment par rapport au point C, de la résultante des surcharges éventuelles appliquées (en valeurs de calcul) directement sur l'écran entre sa tête et le point C ;

La résolution de cette équation est menée par un processus de recherche dichotomique avec un critère d'arrêt relatif fixé à 10^{-4}.



Sur la Figure C 18, l'effort R_C désigne la résultante (valeur de calcul) des efforts horizontaux appliqués sur la hauteur comprise entre la tête de l'écran et le point C :

$$R_C = -R(p_d)|_C - R(S_d)|_C$$

Où :

- $R(p_d)|_C$: résultante du diagramme de pressions différentielles p_d sur la hauteur comprise en la tête de l'écran et le point C ;
- $R(S_d)|_C$: résultante des surcharges appliquées (en valeurs de calcul) directement sur l'écran entre sa tête et le point C.

La vérification de la contre-butée a pour objectif de s'assurer que la contre-butée disponible est suffisante pour reprendre l'effort R_C.

C.3.1.3.3. Vérification de la contre-butée avec l'approche F

L'approche F est basée sur l'hypothèse simplificatrice qui consiste à prendre comme point de transition le point « C » obtenu en C.3.1.3.2. Cette hypothèse se révèle acceptable pour les pratiques usuelles des calculs de soutènement. Elle est notamment reconnue dans le traité de construction des Techniques de l'ingénieur n° C244 [3].

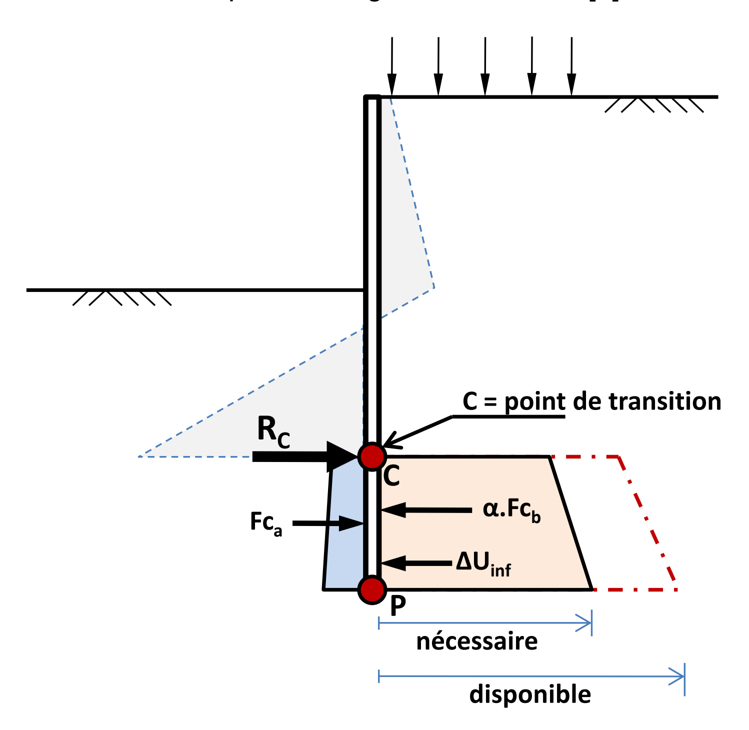


Figure C 19 : Vérification de la contre butée selon l'approche F

Ainsi, selon les notations de la figure ci-dessus, l'équilibre des efforts horizontaux se traduit par l'égalité :

$$R_C = \alpha.Fc_b - Fc_a + \Delta U_{inf} + R(S_d)|_P^C$$

Où :

- $R(S_d)|_P^C$: est la résultante des surcharges éventuelles, appliquées directement sur l'écran sous le point C ;

- ΔU_{inf} : est la résultante des pressions différentielles d'eau exercées sur l'écran sous le point C.

Le facteur de mobilisation « α » est ainsi obtenu par la relation :

$$\alpha = \frac{R_C + Fc_a - \Delta U_{inf} - R(S_d)_P^C}{Fc_b}$$

La vérification de la contre-butée peut ainsi être traduite par la condition : $\alpha \leq 1$
Il est à noter que cette approche conduit à une sur estimation de la valeur de α et ne permet pas, par construction, d'estimer le moment sous le point C.

C.3.1.3.4. Vérification de la contre-butée avec l'approche D

Une approche alternative nommée « approche D » est également proposée dans K-Réa et permet de s'affranchir de l'hypothèse simplificatrice de l'approche F décrite en C.3.1.3.3 consistant à prendre comme point de transition le point C obtenu dans la procédure de vérification de la fiche (chapitre C.3.1.3.2).

Cette approche consiste à rechercher le point de transition $\mathbf{z_n}$ pour assurer l'équilibre global à la fois des efforts et des moments sur toute la hauteur de l'écran (figure ci-dessous).

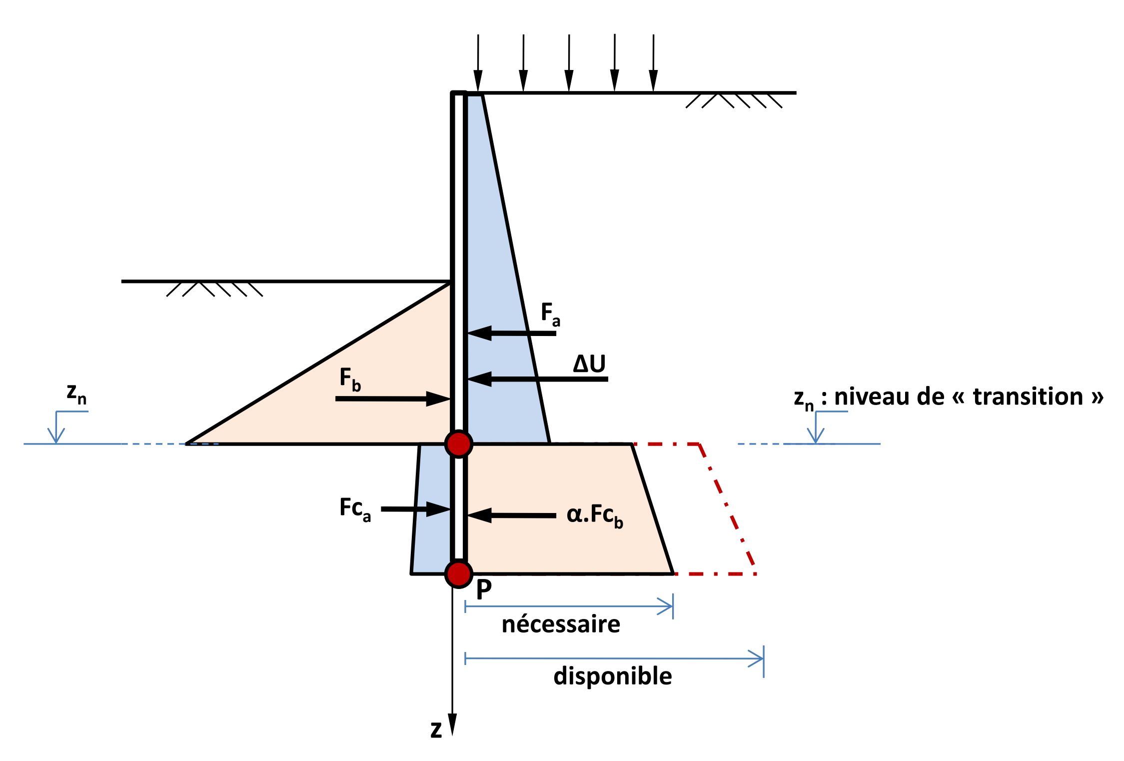


Figure C 20 : Vérification de la contre-butée selon l'approche D

L'équilibre global de l'écran peut être traduit par un système de deux équations à deux inconnues (**α, $\mathbf{z_n}$**) :

- Equilibre des efforts : $F_a - F_b + \alpha.Fc_b - Fc_a + \Delta U + R(S_d) = 0$
- Equilibre des moments : $M(F_a) - M(F_b) + \alpha.M(Fc_b) - M(Fc_a) + M(\Delta U) + M(S_d) = 0$

Où :

- F_a, F_b, Fc_a, Fc_b sont respectivement les résultantes des diagrammes de poussée, butée, contre-poussée et contre-butée telles que définis en C.3.1.3.1. Leurs valeurs sont fonctions de la position du point de transition $\mathbf{z_n}$;



- $M(F_a)$, $M(F_b)$, $M(Fc_a)$, $M(Fc_b)$ sont respectivement les moments des efforts F_a, F_b, Fc_a, Fc_b par rapport au point P (pied de l'écran). Leurs valeurs sont également fonctions de la position de z_n.
- ΔU et $M(\Delta U)$ respectivement la résultante du diagramme de pressions différentielles d'eau et le moment correspondant par rapport au point P. Leurs valeurs sont indépendantes de z_n.
- $R(S_d)$ et $M(S_d)$ respectivement la résultante et le moment par rapport à P des surcharges éventuelles (valeurs de calcul) appliquées directement sur l'écran.

La résolution de ce système d'équations est menée par un processus de recherche dichotomique avec un critère d'arrêt relatif fixé à 10^{-4}.

La mise en œuvre de cette approche permet ainsi d'obtenir simultanément la cote de transition $\mathbf{z_n}$ et le facteur α permettant de vérifier la contre butée à travers la condition : $\alpha \leq 1$.

C.3.2. Calcul des efforts ELU

Conformément aux dispositions de la norme NF P 94-282, l'évaluation des efforts ELU doit être menée sur la base du modèle utilisé pour la vérification du défaut de butée. Par conséquent, dans K-Réa, les efforts ELU sont évalués de manière différente entre les phases où l'écran est en console et celles où l'écran est ancré par un ou plusieurs niveaux d'appuis (tirants, butons…).
Il est à noter que K-Réa calcule les efforts ELU à utiliser pour effectuer la vérification des efforts, mais n'effectue pas directement la vérification proprement dite.

C.3.2.1. Phases où l'écran est ancré

Dans ce cas, les valeurs de calcul des efforts ELU (M_d, V_d) sont obtenues par les relations :

- Moment : $M_d = \gamma_{mt}.M_k$
- Effort tranchant : $V_d = \gamma_{mt}.V_k$

Le coefficient γ_{mt} vaut 1,35 dans le cas de la norme NF P 94-282.

Les valeurs caractéristiques des efforts M_k, V_k sont obtenues avec le modèle utilisé pour l'évaluation de la butée mobilisée tel que décrit en C.3.1.2. Pour rappel, il s'agit d'un modèle de type « MISS » (modèle de base de K-Réa), mené sans pondération des caractéristiques du sol (approche 2) mais en appliquant un coefficient de pondération «$\gamma_{q,1}$» (voir Tableau C 2) sur les valeurs caractéristiques des surcharges appliquées sur le terrain et sur l'écran.

C.3.2.2. Phases où l'écran est en console

Dans ce cas, le modèle utilisé est celui d'équilibre limite (MEL). Les valeurs de calcul (M_d, V_d) sont obtenues en calculant directement, en tout point, le moment et l'effort tranchant en considérant l'équilibre de l'écran soumis aux diagrammes de pressions $p_{a,d}$, $p_{b,d}$, $pc_{a,d}$, $\alpha.pc_{b,d}$ et ($u_a - u_b$) (Figure C 16), et en tenant compte des valeurs de calcul des surcharges éventuelles appliquées directement sur l'écran.

Bien que le « principe » de calcul soit identique quelle que soit l'approche de calcul retenue pour l'évaluation de la contre-butée (F ou D), la représentation des diagrammes de (M_d, V_d) dépend de l'approche retenue :

- Dans le cas où l'approche F est utilisée pour l'évaluation de la contre-butée, les efforts (M_d, V_d) sont représentés seulement jusqu'au point C où le moment M_d

s'annule. Au-delà du point C, le calcul, notamment du moment, s'avère incompatible avec l'équilibre global de l'écran (moment non nul en pied) ;

- En revanche, pour les cas où la contre-butée est vérifiée à l'aide de l'approche D, les efforts (M_d, V_d) sont représentés sur toute la hauteur de l'écran et s'avèrent compatibles avec l'équilibre global de l'écran et ses conditions aux limites.

C.3.3. Vérification du bilan vertical

C.3.3.1. Principe général

La vérification du bilan vertical consiste à estimer la résultante verticale des efforts appliqués sur l'écran, et à vérifier son orientation (vers le haut si la résultante est négative, ou vers le bas si la valeur est positive). La résultante verticale des efforts, si elle est orientée vers le bas, doit ensuite servir de paramètre d'entrée pour vérifier la portance de l'écran (à l'aide de modèles de calcul spécifique non intégrés à K-Réa).

Cette vérification permet notamment de juger de la pertinence des valeurs considérées pour les inclinaisons de poussée/butée et contre-butée.

La valeur de calcul de la résultante verticale Rv_d des efforts appliqués sur l'écran est donnée par l'expression générale suivante :

$$Rv_d = P_0 + Pv_d + Fv_d + Tv_d$$

Où :

- P_0 : poids total de l'écran ;
- Pv_d : valeur de calcul de la résultante verticale des pressions des terres sur la hauteur de l'écran ;
- Fv_d : valeur de calcul de la résultante verticale des forces linéiques inclinées s'exerçant sur l'écran ;
- Tv_d : valeur de calcul de la résultante verticale des efforts dus aux tirants inclinés connectés à l'écran.

Les composantes verticales des pressions des terres sont déduites des pressions horizontales qui régissent le modèle de calcul de base.

Le poids de l'écran P_0 est calculé en multipliant le poids surfacique noté W de l'écran tel que défini lors de la saisie des caractéristiques de l'écran par la hauteur totale de l'écran. Aucune pondération n'est appliquée sur P_0.

Le calcul de Pv_d, Fv_d et Tv_d est décrit dans les paragraphes qui suivent. Ces efforts sont pris par convention <u>positifs vers le bas</u>.

C.3.3.2. Calcul de Pv_d

Le calcul de Pv_d dépend du modèle utilisé pour le calcul de l'équilibre horizontal de l'écran.

C.3.3.2.1. Phases où l'écran est ancré

Dans ce cas, le modèle utilisé pour l'équilibre horizontal est le modèle de base de K-Réa (MISS, avec pondération des surcharges par le coefficient $\gamma_{q,1}$). La valeur de Pv_d est obtenue par intégration, sur la hauteur de l'écran, de la composante verticale du diagramme des pressions des terres appliquées des deux côtés de l'écran 1 et 2 :

$$Pv_d = \gamma_{pv} \int \left(p_v^1(z) + p_v^2(z)\right) dz$$



Avec γ_{pv} = 1,35 dans le cadre de la norme NF P 94-282, et pour chaque côté « i », la composante verticale p_v^i est estimée à partir de la pression horizontale mobilisée p_h^i du même côté :

$$p_v^i = \begin{cases} p_{av}^i \left(\dfrac{p_0^i - p_h^i}{p_0^1 - p_a^1} \right) & \text{si } p_a^i \leq p_h^i \leq p_0^i \\ p_{bv}^i \left(\dfrac{p_h^i - p_0^i}{p_b^i - p_0^i} \right) & \text{si } p_0^i \leq p_h^i \leq p_b^i \end{cases}$$

Avec, pour chaque côté « i », les valeurs caractéristiques suivantes :

- p_h^i , p_v^i : respectivement pressions horizontale et verticale mobilisées ;
- p_a^i , p_b^i : respectivement poussée et butée horizontales limites ;
- p_{av}^i , p_{bv}^i : respectivement poussée et butée verticales limite ;
- p_0^i : pression horizontale au repos.

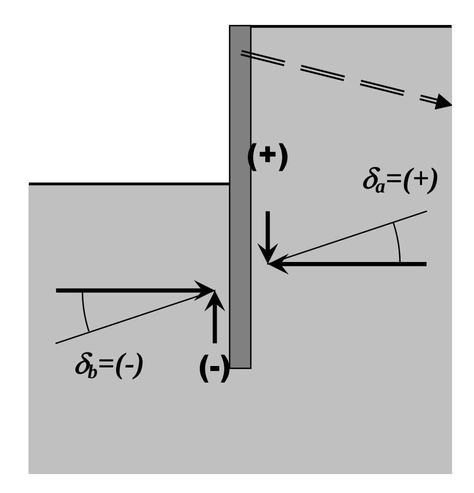


Figure C 21 : Orientation des composantes verticales des pressions limites

Les valeurs de p_{av}^i et p_{bv}^i se déduisent de celles de p_a^i et p_b^i à l'aide de la relation :

$$p_{av}^i = \tan\left(\delta_a^i\right).p_a^i \qquad \text{et} \qquad p_{bv}^i = \tan\left(\delta_b^i\right).p_b^i$$

Où, pour chaque côté « i », $\delta_a{}^i$ et $\delta_b{}^i$ sont les valeurs de l'inclinaison des efforts des poussée et de butée limites par rapport à l'horizontale.

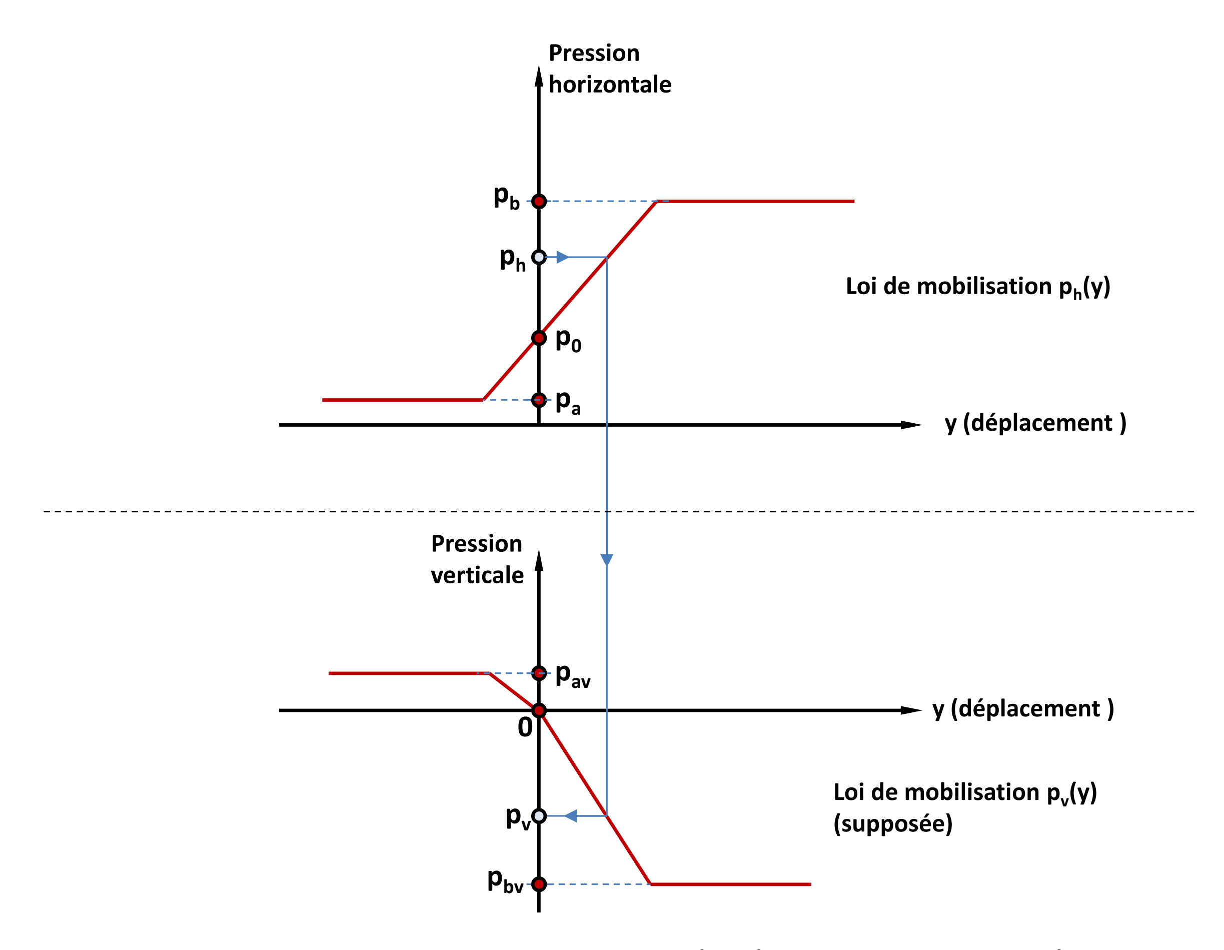


Figure C 22 : Principe de calcul de la pression verticale à un état de mobilisation « intermédiaire »

Comme le schématise la figure ci-dessus, l'approche adoptée pour l'évaluation de la composante verticale des pressions des terres permet de traduire, de manière simplifiée, le fait que les inclinaisons des efforts de poussée ou butée $\delta_a{}^i / \delta_b{}^i$ ne sont mobilisées qu'à l'état limite. A un état de mobilisation intermédiaire « p_h^i », la composante verticale p_v^i peut être estimée au prorata de ce qui est mobilisé horizontalement entre l'état limite (p_a^i ou p_b^i) et l'état au repos p_0^i, pour laquelle la composante verticale est considérée nulle.

C.3.3.2.2. *Phases où l'écran est en console*

Dans ce cas, le modèle utilisé pour l'équilibre horizontal est un modèle d'équilibre limite. Les pressions verticales des terres sont donc directement déduites des pressions horizontales en considérant les inclinaisons limites de poussée/butée. On désigne par « 1 » le côté de la poussée/contre-butée et par « 2 » celui de la butée/contre poussée.

La valeur de calcul de la résultante verticale des pressions des terres s'obtient par la relation :

$$Pv_d = Pv_d^+ + Pv_d^-$$

Avec :

- $Pv_d^+ = F_{av} + F_{bv}$: résultante des pressions des terres exercées au dessus du point de transition « z_n » tel que défini en C.3.1.3.
- $Pv_d^- = Fc_{av} + \alpha . Fc_{bv}$: résultante des pressions des terres exercées sous le point de transition « z_n » tel que décrit en C.3.1.3. Le paramètre « α » est bien le coefficient de mobilisation de la contre-butée défini en C.3.1.3.



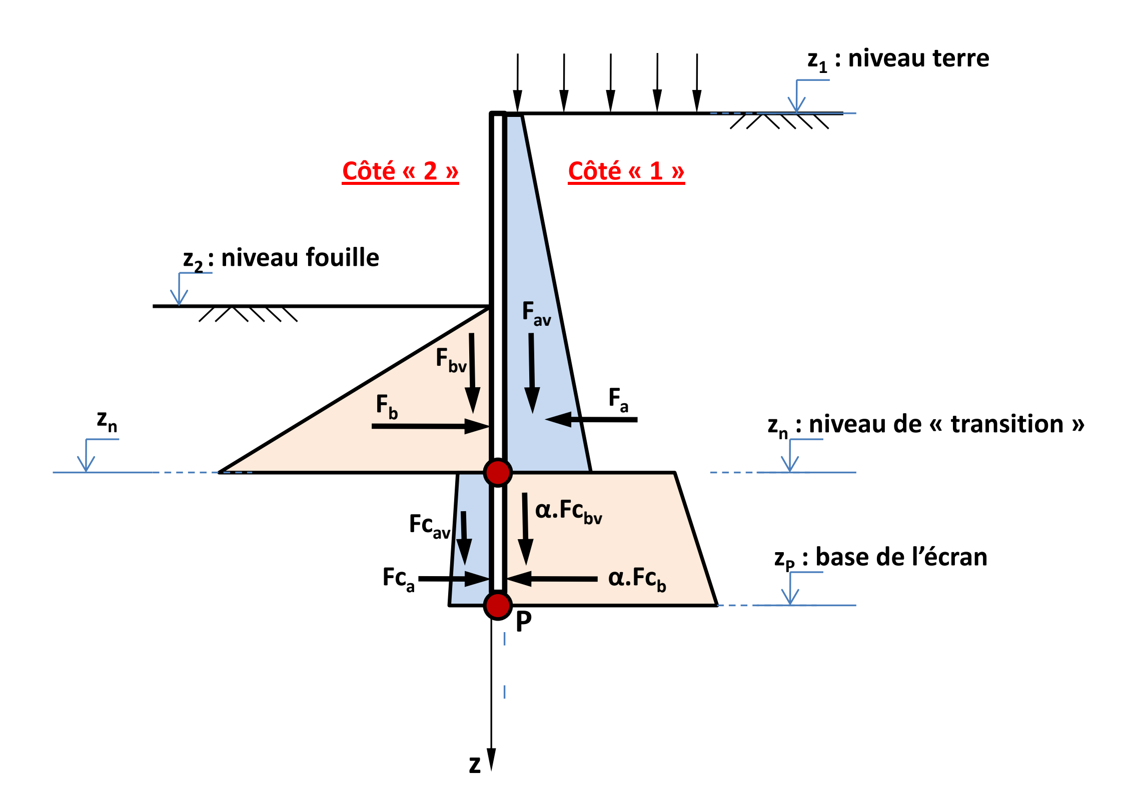


Figure C 23 : Bilan des efforts pour le cas d'un modèle d'équilibre limite (MEL).

Avec les notations de la figure ci-dessus et celles du paragraphe C.3.1.3, on a :

- $F_{av} = \int_{z_1}^{z_n} \tan(\delta_a^1).p_{a,d}(z)dz$ et $F_{bv} = \int_{z_2}^{z_n} \tan(\delta_b^2).p_{b,d}(z)dz$
- $Fc_{av} = \int_{z_n}^{z_p} \tan(\delta_a^2).pc_{a,d}(z)dz$ et $Fc_{bv} = \int_{z_n}^{z_p} \tan(\delta_{cb}^1).pc_{b,d}(z)dz$

Où :

- $\delta_a{}^i$: valeur caractéristique de l'inclinaison des efforts de poussée/contre poussée ;
- $\delta_b{}^2$: valeur caractéristique de l'inclinaison des efforts de butée ;
- $\delta_{cb}{}^1$: valeur caractéristique de l'inclinaison des efforts de contre butée ;

On fait remarquer que pour une couche et un niveau donné, il y a distinction entre les inclinaisons attribuées aux efforts de butée et ceux de contre butée. En revanche, entre la poussée et la contre poussée, les inclinaisons des efforts sont supposées identiques (pour une même couche et un même niveau).

Afin de pouvoir assurer simultanément la vérification des bilans des efforts verticaux et horizontaux, avec des pressions compatibles, l'utilisateur sera amené, le cas échéant, à modifier l'inclinaison pour la contre-butée (cet aspect est évoqué plus en détail dans les parties B et D du manuel).

C.3.3.3. Calcul de Fv_d

L'évaluation de Fv_d est menée en projetant verticalement (vers le bas) l'ensemble des forces linéiques appliquées sur l'écran et actives à la phase examinée. Dans ce calcul, il est pris en compte les valeurs de calcul des forces linéiques prises égales aux produits des valeurs caractéristiques par le coefficient de pondération $\gamma_{q,2}$ défini dans le Tableau C 3.

C.3.3.4. Calcul de Tv_d

L'évaluation de Tv_d est menée en projetant verticalement (vers le bas) l'ensemble des efforts repris par les tirants connectés à l'écran et actifs à la phase examinée. Dans ce calcul, il est pris en compte les valeurs de calcul des efforts des tirants prises égales aux produits des valeurs caractéristiques par un coefficient de pondération γ_{tv}, égal à 1,35 dans le cas de la norme NF P 94-282.



C.3.4. Vérification de la stabilité du massif d'ancrage

C.3.4.1. Principe général

Le principe général de la vérification est de s'assurer que les efforts d'ancrage (correspondant aux tirants d'ancrage uniquement) peuvent être transférés au massif de sol en toute sécurité, en vérifiant la stabilité de la surface de rupture à la base du massif de sol, et de montrer ainsi que la longueur de chaque tirant d'ancrage est suffisante.

Cette vérification est menée selon l'approche « Kranz » simplifiée évoquée dans l'annexe G de la norme NF P 94 -282. Le caractère simplifié de la méthode réside dans l'adoption d'une surface de rupture plane (CD) comme le montre la Figure C 24.

Selon les notations de la Figure C 24, cette vérification consiste à justifier la stabilité du massif ABCDA en s'assurant que l'effort d'ancrage dans le tirant demeure inférieur à une valeur limite correspondant à l'équilibre ultime du massif, appelée « effort déstabilisant ». La méthode « Kranz » propose une démarche pour déterminer cet effort déstabilisant

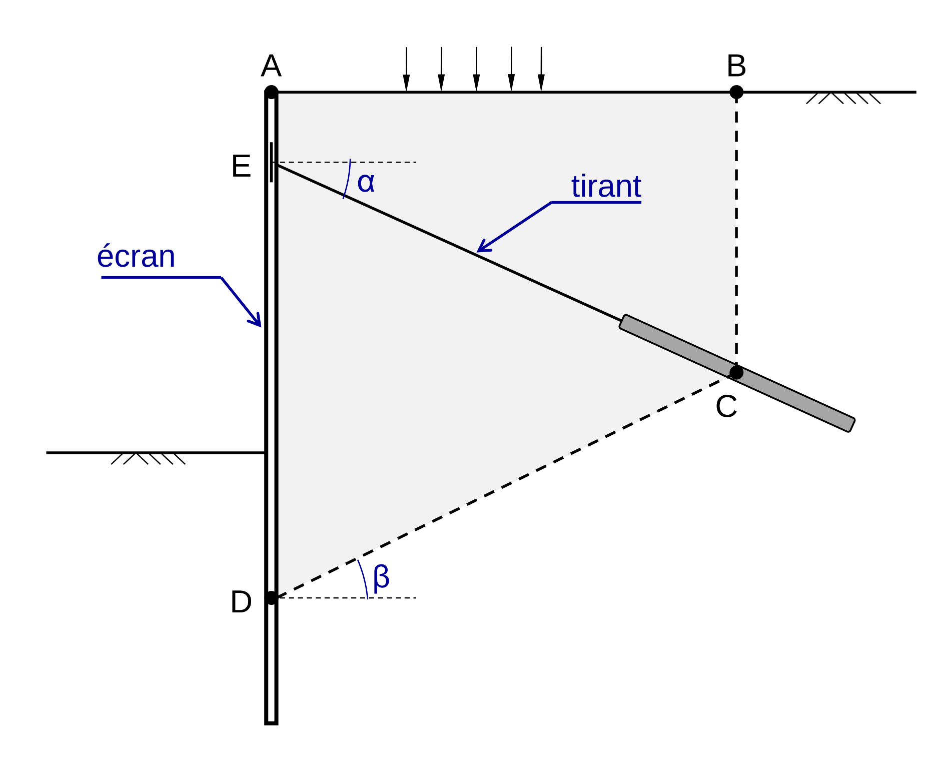


Figure C 24 : Approche Kranz simplifiée – Schéma de principe

C.3.4.2. Cas d'un seul tirant

C.3.4.2.1. Définition du massif d'ancrage

Le massif d'ancrage ABCDA objet de la vérification est délimité par les points suivants :

- **A** : tête de l'écran ou intersection de l'écran avec le toit de la première couche ;
- **D** : point d'effort tranchant nul (pris sous le fond de l'excavation) ;
- **C** : point d'ancrage effectif du tirant correspondant à la longueur utile du tirant $\mathbf{L_u}$ **;**
- **B** : projection verticale du point C sur l'axe (AX) **;**

On désigne par E le point d'ancrage du tirant sur l'écran et par F le niveau de la nappe phréatique supposée horizontale.

C.3.4.2.2. Bilan des efforts extérieurs

La Figure C 25 récapitule le bilan des efforts appliqués sur le massif ABCDA.

Avec (valeurs caractéristiques) :

- T : effort d'ancrage du tirant ;
- P_1 : réaction de l'écran, prise égale à la résultante des pressions de terres sur [AD]
- P_2 : effort de poussée exercé à l'amont du massif sur [BC] ;
- W : poids du massif (humide au-dessus de la nappe, et déjaugé en-dessous). La nappe est supposée horizontale ;
- F_e : résultante des surcharges extérieures appliquées sur ou dans le massif ;
- R_c : résistance limite due à la cohésion mobilisable le long de [CD] ;
- R_f : résistance limite due au frottement mobilisable le long de [CD].

L'équilibre limite du massif se traduit ainsi par l'équation vectorielle :

$$\vec{R_c} + \vec{R_f} + \vec{W} + \vec{F_e} + \vec{P_1} + \vec{P_2} + \vec{T} = \vec{0}$$

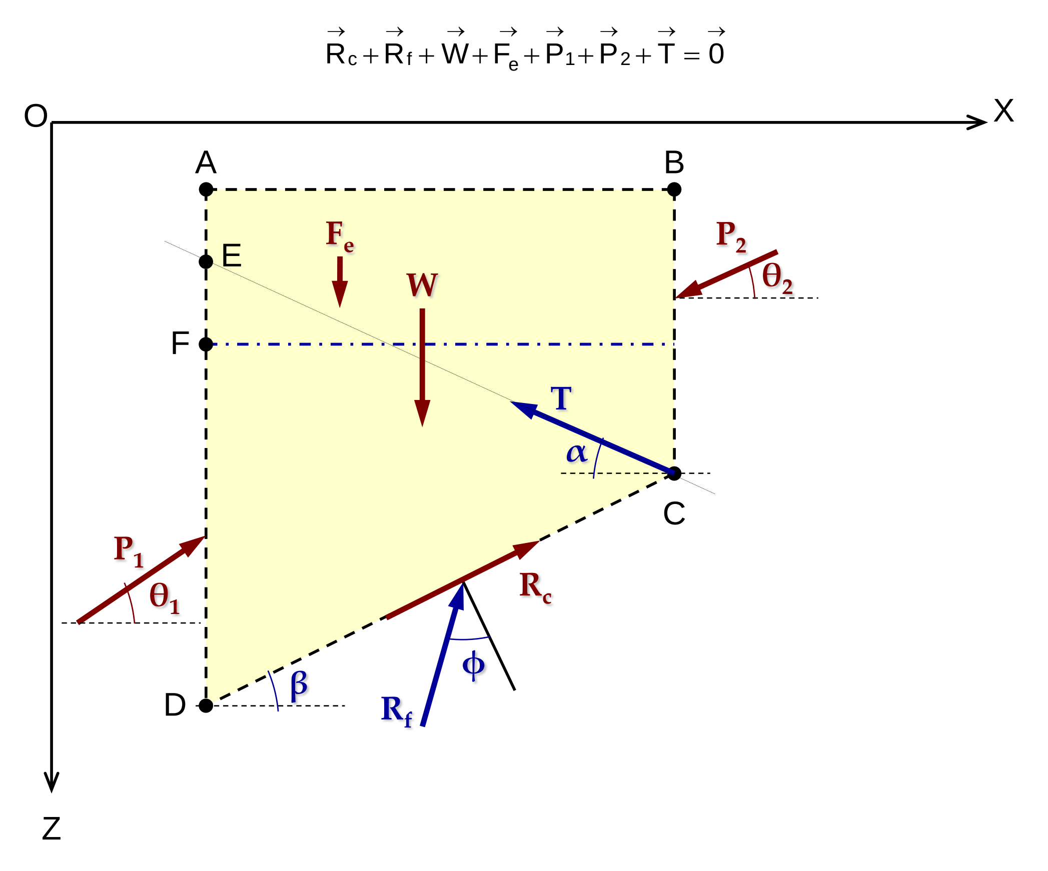


Figure C 25 : Bilan schématique des efforts exercés sur le massif d'ancrage



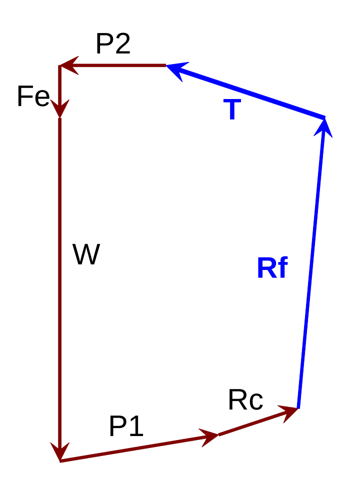


Figure C 26 : Diagramme des efforts exercés sur le massif d'ancrage

Les figures ci-dessus appellent plusieurs commentaires :

- L'effort de frottement R_f est incliné d'un angle égal à φ par rapport à la normale sur (CD). Dans le cas d'un massif de sol homogène, cette inclinaison n'est autre que l'angle de frottement de celui-ci ;

- La composante horizontale de P_1, notée P_{1H}, est calculée directement par intégration des pressions horizontales mobilisées, résultat du calcul d'équilibre horizontal de l'écran (modèle MISS avec application de 1,11 sur les surcharges). Sa composante verticale, notée P_{1V} est calculée avec la même démarche que celle considérée pour la vérification de l'équilibre vertical de l'écran (voir chapitre C.3.3.2.1) ;

- L'effort de poussée amont P_2 est supposé horizontal (P_{2V} = 0). Sa composante horizontale P_{2H} est calculée directement à partir des caractéristiques des couches rencontrées entre B et C, et tenant compte des surcharges appliquées à l'amont du massif d'ancrage ;

- Le calcul de l'effort R_c se fait par simple intégration de la cohésion du sol le long du segment [CD] tenant compte de sa variation éventuelle avec la profondeur.

Pour toute la suite, on désigne par $\mathbf{T_{dsb}}$ la valeur de T permettant d'atteindre l'équilibre du massif (effort d'ancrage déstabilisant).

C.3.4.2.3. Discrétisation du massif d'ancrage

On se place dans le cas général où la surface de rupture supposée [CD] traverse plusieurs couches de sol. Dans ce cas, la résolution de l'équilibre limite du massif nécessite de discrétiser le massif (ABCDA) en autant de blocs que de couches traversées, de sorte que la « base » d'un bloc donné soit « homogène ». L'intérêt de cette discrétisation est de fixer l'inclinaison de l'effort de frottement mobilisable à la base de chaque bloc (voir figure ci-après).

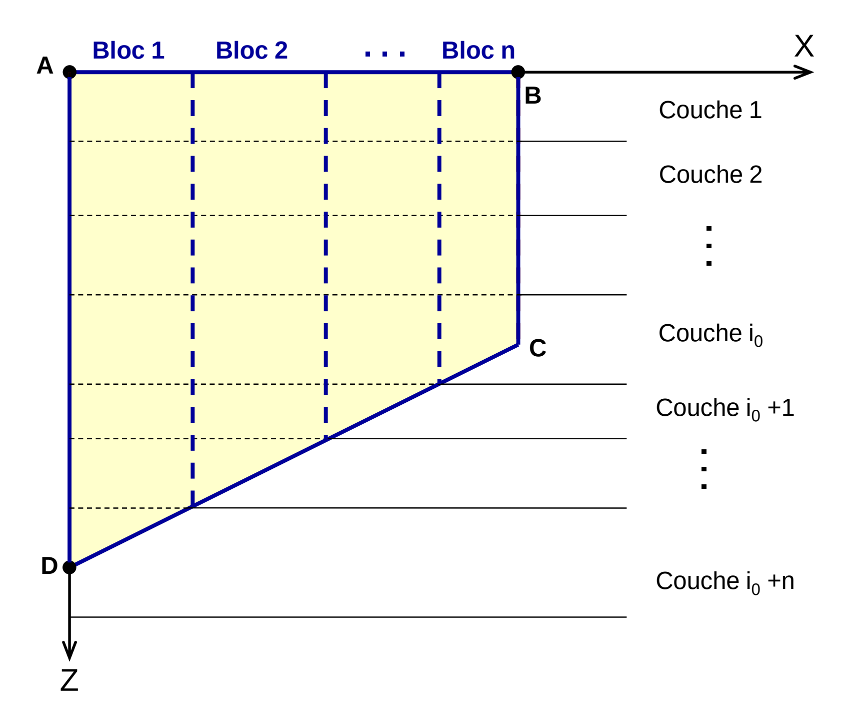


Figure C 27 : Discrétisation du massif d'ancrage en plusieurs blocs

Comme le schématise la figure ci-dessous, l'équilibre local d'un bloc « k » est régi par le système d'efforts suivants :

- $H_1^{(k)}$ et $V_1^{(k)}$ respectivement les composantes horizontale et verticale de la réaction extérieure selon la frontière verticale gauche ;
- $H_2^{(k)}$ et $V_2^{(k)}$ respectivement les composantes horizontale et verticale de la réaction extérieure selon la frontière verticale droite ;
- $W^{(k)}$ poids propre <u>déjaugé ;</u>
- $F_e^{(k)}$ résultante des surcharges extérieures appliquées <u>dans le bloc</u> k ;
- $R_c^{(k)}$ résistance due à la cohésion mobilisable le long du segment $D^{(k)}C^{(k)}$;
- $R_f^{(k)}$ résistance due au frottement mobilisable le long du segment $D^{(k)}C^{(k)}$.

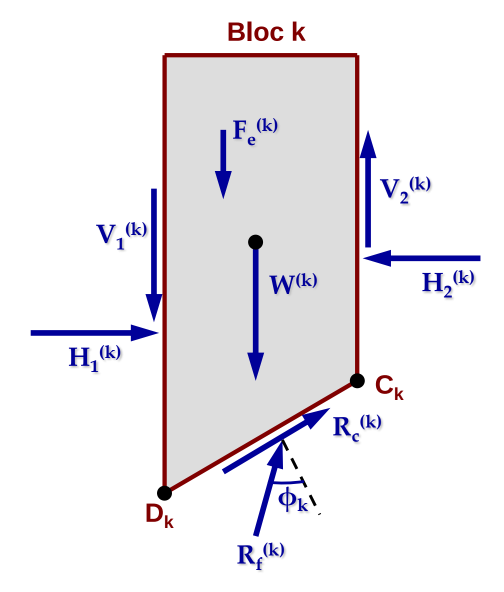


Figure C 28 : Equilibre local d'un bloc – bilan des efforts

Dans la figure ci-dessus, φ_k désigne l'angle de frottement de la couche de sol rencontrée à la base du bloc « k ».



Par souci de simplification, on adopte l'hypothèse dite de Bishop qui consiste à supposer que les réactions « inter – blocs » sont horizontales, ce qui revient à considérer, selon les notations de la Figure C 28 que :

$$V_1^{(k)} = 0 \text{ et } V_2^{(k)} = 0$$

Cette condition est valable uniquement le long des frontières « inter – blocs », une exception est donc à considérer pour le premier (k = 1) et le dernier bloc (k = n). On aboutit ainsi au schéma général de la figure ci-dessous :

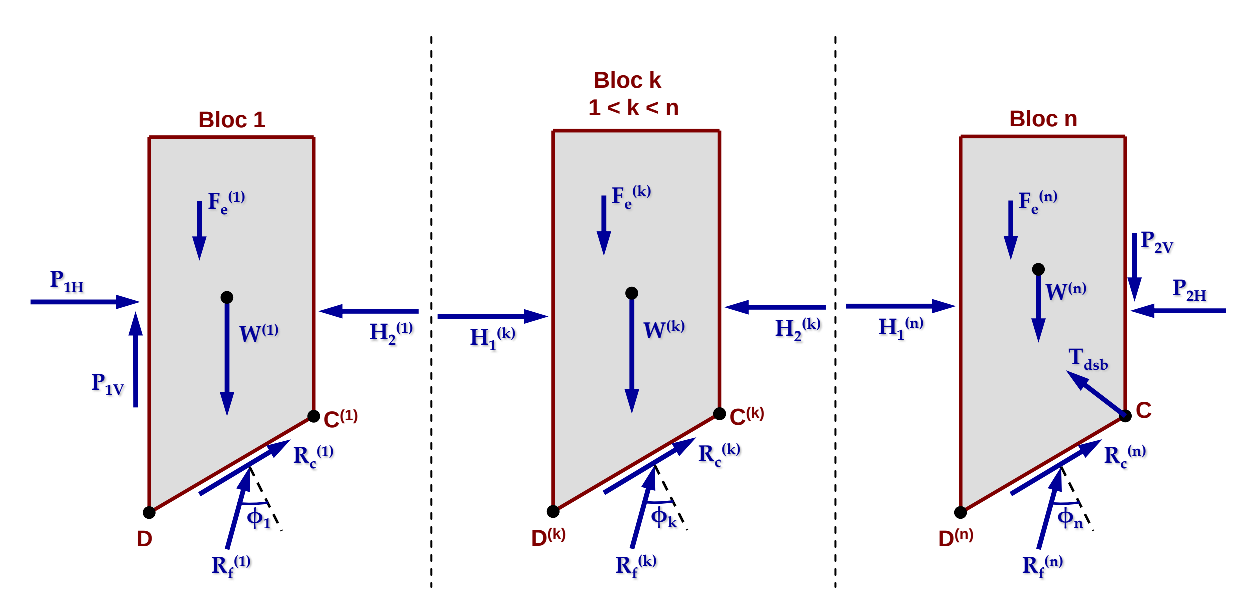


Figure C 29 : Equilibres locaux des blocs tenant compte de l'hypothèse simplificatrice de Bishop

Il est à noter que du fait des coupures successives, l'effort d'ancrage T_{dsb} est pris en compte uniquement dans l'équilibre du dernier bloc (n). En réalité, comme la ligne d'action est unique, l'affectation de cet effort à l'un quelconque des blocs s'avère sans incidence.

C.3.4.2.4. Résolution de l'équilibre général

Pour une discrétisation en « n » blocs, la mise en équation des équilibres locaux conduit à un système de 3n – 1 équations à 3n – 1 inconnues. Plus précisément, le système d'équations est obtenu en projetant l'équilibre local de chaque bloc selon Ox et Oz (soit 2 équations par bloc) et en écrivant le principe d'action/réaction entre deux blocs jointifs se traduisant par : $H_1^{(k)} = H_2^{(k-1)}$.

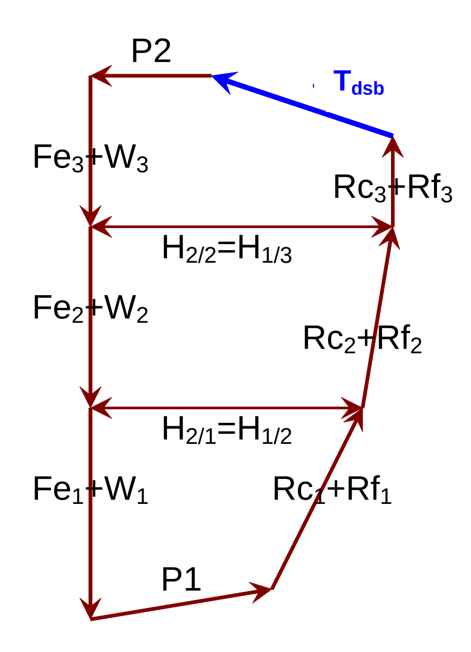


Figure C 30 : Exemple de bilan des efforts pour le cas de 3 blocs

La résolution de ce système d'équations permet d'obtenir les valeurs de $H_1^{(k)}$, $H_2^{(k)}$, $R_f^{(k)}$ et $\mathbf{T_{dsb}}$.

C.3.4.2.5. Vérification

L'obtention de la valeur caractéristique de l'effort déstabilisant $T_{dsb,k}$ permet de conduire la vérification de la stabilité du massif d'ancrage à l'ELU :

- On désigne par $T_{dsb,d}$ la valeur de calcul de l'effort déstabilisant prise égale à :

$$T_{dsb,d} = \frac{T_{dsb,k}}{\gamma_2}$$

  Le coefficient γ_2 vaut 1,10 dans le cas de la norme NF P 94-282.

- On désigne par $T_{réf,d}$ la valeur de calcul de l'effort d'ancrage $T_{réf}$ repris par le tirant (issu du calcul d'équilibre horizontal de l'écran) prise égale à :

$$T_{réf,d} = \gamma_1 . T_{réf}$$

  Le coefficient γ_1 vaut 1,35 dans le cas de la norme NF P 94-282.

La stabilité du massif d'ancrage est justifiée si : $T_{réf,d} \leq T_{dsb,d}$.



C.3.4.3. Cas de plusieurs tirants

C.3.4.3.1. Principe général

On considère le cas d'un écran ancré par plusieurs lits de tirants comme le schématise la figure ci-dessous. La vérification de la stabilité du massif d'ancrage est menée en examinant successivement la stabilité des massifs « associés » à chaque tirant tel que cela a été défini pour le cas d'un tirant unique. Ainsi pour chaque tirant « j », on examine la stabilité du massif AB_jC_jDA tenant compte des efforts d'ancrage de tous les tirants situés à l'intérieur de ce massif.

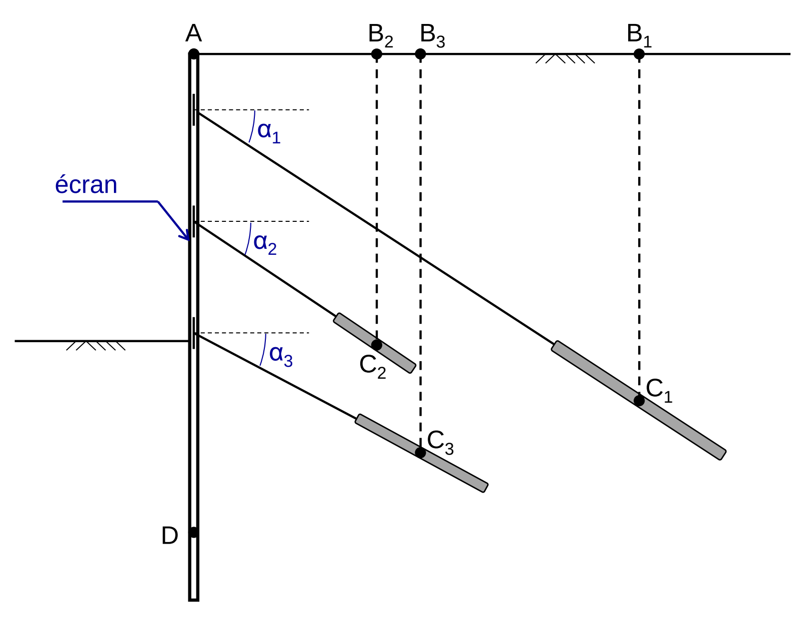


Figure C 31 : Généralisation au cas de plusieurs lits de tirants

A titre d'exemple, pour le cas schématisé dans la figure ci-dessus, la vérification de la stabilité du massif d'ancrage consiste à examiner trois situations :

- Situation 1 : on isole le massif d'ancrage AB_1C_1DA associé au tirant « 1 ». Les points d'ancrage C_2 et C_3 sont situés à l'intérieur du massif, par conséquent les trois tirants sont pris en compte ;

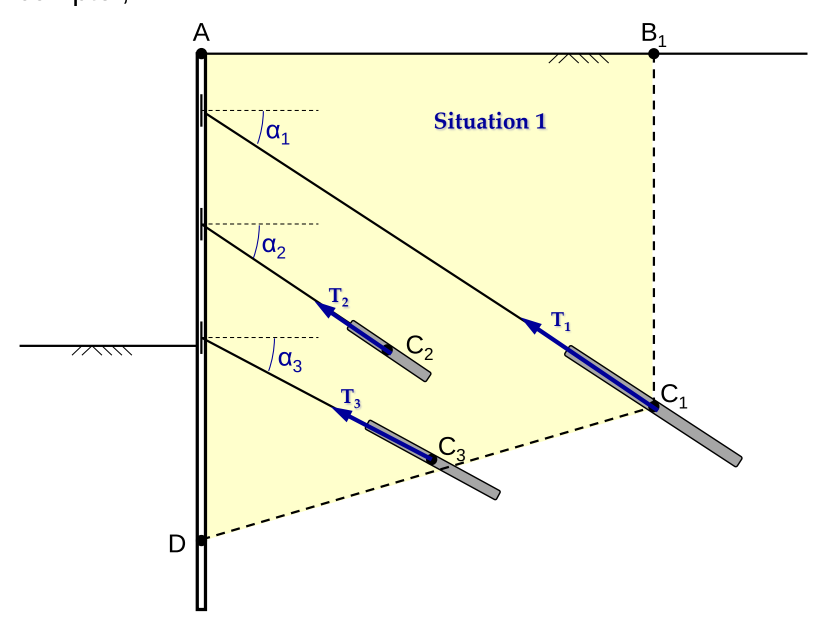


Figure C 32 : Exemple d'application - Situation 01

- Situation 2 : on isole le massif d'ancrage AB_2C_2DA associé au tirant « 2 ». Les points d'ancrage C_1 et C_3 sont situés à l'extérieur du massif, par conséquent seul le tirant « 2 » est pris en compte ;

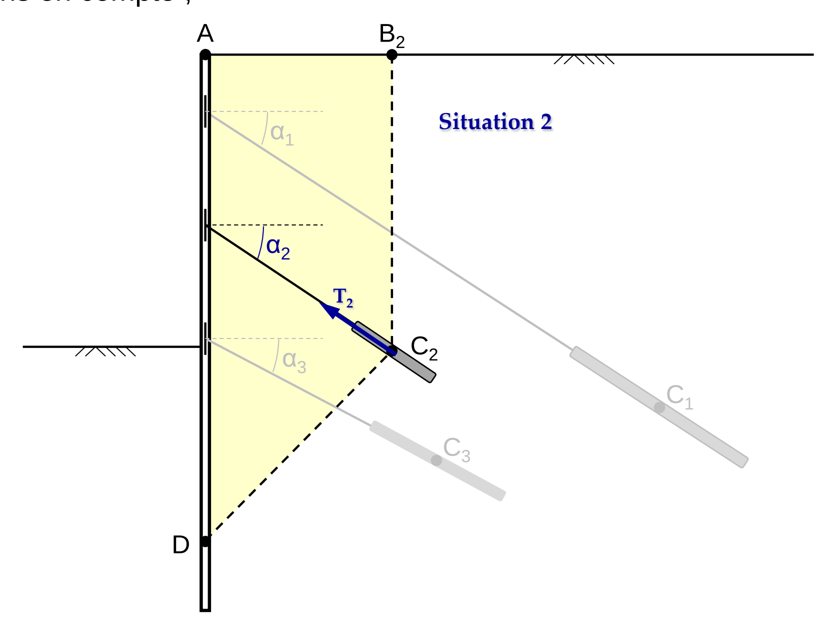


Figure C 33 : Exemple d'application - Situation 02

- Situation 3 : on isole le massif d'ancrage AB_3C_3DA associé au tirant « 3 ». Le point d'ancrage C_2 est situé à l'intérieur du massif, tandis que C_3 est situé à l'extérieur. Les tirants 2 et 3 sont donc pris en compte.

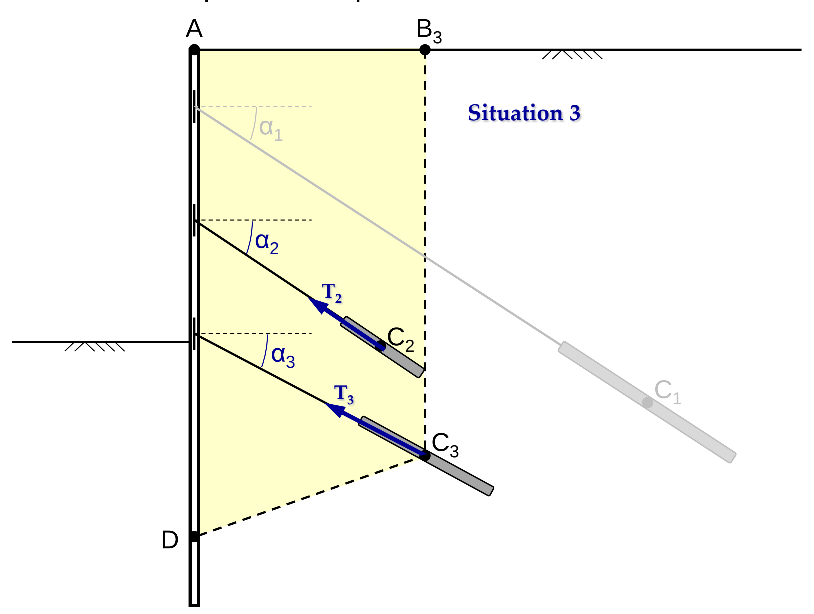


Figure C 34 : Exemple d'application - Situation 03

Pour une situation donnée, la prise en compte ou non d'un tirant d'ancrage est contrôlée par la position relative de son point d'ancrage par rapport aux frontières du massif d'ancrage étudié. L'attention est attirée sur le cas où ce point d'ancrage, bien qu'il soit situé géométriquement en dehors du massif, se trouve à proximité des frontières BC ou CD, et auquel cas son influence ne peut être négligée. Le recours à l'option complémentaire présentée dans le paragraphe §C.3.4.3.4 permet de surmonter cette limitation.



C.3.4.3.2. Bilan des efforts

Pour une situation donnée, on calcule la résultante équivalente T_{eq} des efforts T_i repris par tous les tirants pris en compte dans cette situation. On désigne par α_{eq} l'inclinaison de cet effort résultant par rapport à l'horizontale. Pour l'examen de la stabilité du massif d'ancrage associé à la situation considérée, on se ramène donc à un système d'équilibre similaire à celui considéré pour un seul tirant (figure ci-dessous), avec un tirant « fictif » incliné α_{eq} par rapport à l'horizontale et reprenant un effort égal à T_{eq}.

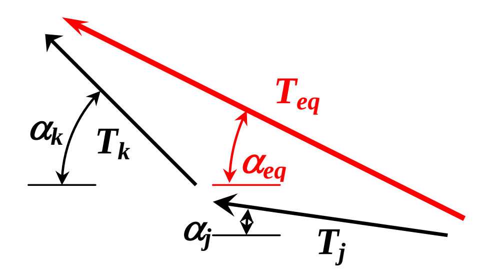


Figure C 35 : Résultante d'un tirant fictif

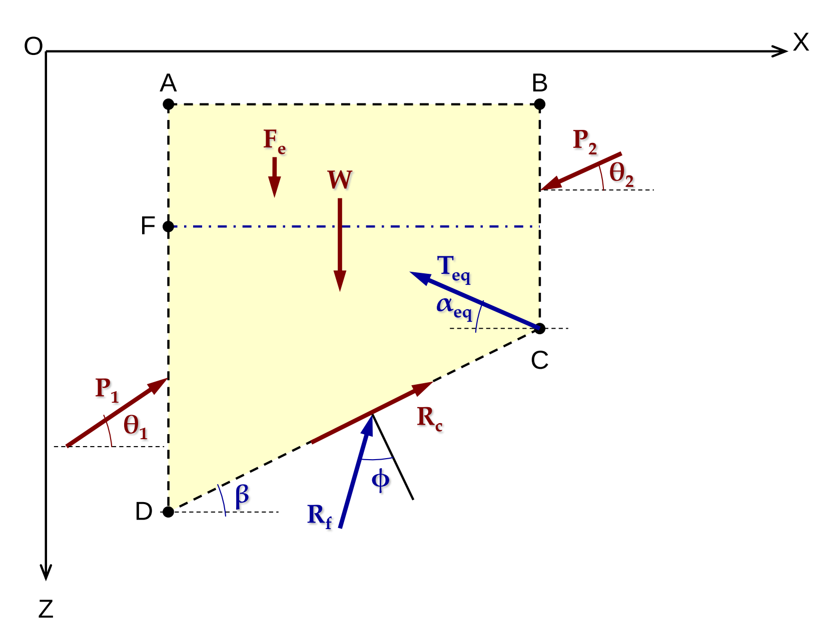


Figure C 36 : Bilan des efforts pour une situation donnée

C.3.4.3.3. Résolution

Pour chaque situation, la mise en équation se fait selon une démarche identique à celle suivie pour le cas d'un seul tirant. Pour une situation donnée, la résolution du système d'équilibre fournit la valeur caractéristique de l'effort déstabilisant $T_{dsb,k}$ du massif d'ancrage associé. Sa valeur de calcul $T_{dsb,d}$ prise égale à T_{dsb} / γ_2 est ensuite comparée à la valeur de calcul de l'effort d'ancrage de référence équivalent $T_{réf,d} = \gamma_1 \times T_{eq}$.

La stabilité du massif d'ancrage est justifiée si pour toutes les situations, on a : $T_{réf,d} \leq T_{dsb,d}$.

C.3.4.3.4. <u>Prise en compte de la longueur de scellement</u>

En complément de la démarche présentée ci-dessus, il est possible de « matérialiser » la longueur de scellement « L_S » de chaque tirant dans la gestion des tirants à prendre en compte pour le calcul de l'effort d'ancrage de référence. Ainsi, pour un massif d'ancrage donné, on distingue, pour chaque tirant « i », trois configurations (Figure C 37) :

- Configuration 1 : le point d'ancrage C_i (= milieu du scellement) est situé à l'intérieur du massif, dans ce cas l'effort du tirant « i » est intégralement pris en compte ;
- Configuration 2 : la tête du scellement S_i est située à l'extérieur du massif, dans ce cas le tirant « i » n'est pas pris en compte ;
- Configuration 3 : cas intermédiaire, S_i à l'intérieur, C_i à l'extérieur du massif. L'effort du tirant « i » est alors partiellement pris en compte au prorata du rapport S_iR_i/S_iC_i, où R_i désigne le point d'intersection du scellement avec la frontière extérieure du massif.

Figure C 37 : Les 3 configurations possibles pour un tirant vis-à-vis du massif d'ancrage

Avec les notations ci-dessus, l'effort d'ancrage de référence pris en compte dans une situation donnée est calculé selon la formule suivante :

$$\vec{T}_{\text{réf}} = \sum_i \min\left(\frac{S_iR_i}{S_iC_i};1\right).\vec{T}_i = \sum_i \frac{\min\left(2S_iR_i;L_s^i\right)}{L_s^i}.\vec{T}_i$$



C.4. Bases théoriques utilisées pour les différents assistants à la saisie de données

Ce chapitre décrit les bases théoriques utilisées pour les différents assistants proposés à l'utilisateur. La manipulation de ces assistants est décrite dans la partie B du manuel (manuel d'utilisation).

IMPORTANT : LES ASSISTANTS SONT UNE AIDE APPORTEE AU PROJETEUR MAIS LEUR UTILISATION, QUI EST FACULTATIVE, RESTE DE LA RESPONSABILITE DE L'UTILISATEUR.

C.4.1. Assistants relatifs aux paramètres de sol (cf chapitre B.3.2)

C.4.1.1. Le coefficient k_0

L'assistant **k0 Jaky** calcule la valeur du k_0 par la formule suivante :

$$k_0 = (1 + \sin\beta)(1 - \sin\varphi)\sqrt{OCR}$$

Avec :

β ( ) : inclinaison du terrain
φ ( ) : angle de frottement
OCR : rapport de surconsolidation

C.4.1.2. Les coefficients k_d et k_r

Les coefficients de décompression et de recompression permettent de prendre en compte les variations des contraintes horizontales que le sol exerce sur l'écran dues aux chargements et déchargements de ce sol, en modifiant la pression initiale à déplacement nul et les valeurs des paliers de plasticité (voir chapitre C.2.1.3).

- Si on ne prend pas en compte la consolidation des sols, il convient de définir $k_d = k_r = k_0$.

- Sinon, on peut utiliser par exemple utiliser l'une des méthodes suivantes :
  - Si le matériau est parfaitement élastique alors $k_d = \frac{\nu}{1-\nu}$ avec ν = coefficient de Poisson.
  - Si le matériau est incompressible, alors ν = 0.5 et k_d = 1. C'est le cas quand les sollicitations sont trop rapides pour que le drainage soit possible ou pour les sols très surconsolidés.
  - L'article référencé en [6] propose une formule de calcul pour le coefficient k_d en fonction de la valeur du paramètre OCR.

En général, par symétrie, on adopte $k_r = k_d$.

C.4.1.3. Les coefficients $k_{a\gamma}$ et $k_{p\gamma}$

3 assistants sont proposés dans K-Réa pour la détermination des coefficients $k_{a\gamma}$ et $k_{p\gamma}$ de poussée et butée des terres.

- <u>Assistant « Tables de poussée et de butée des terres de Kerisel et Absi »</u>

  Cet assistant est la reproduction fidèle des tables établies par Kerisel et Absi, éditées par les Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, sous le titre « Tables de poussée et butée des terres de Kerisel et Absi » [1]. C'est l'assistant utilisé en « mode automatique" ».

- <u>Assistant « Poussée et butée des terres selon la formule de Coulomb »</u>

  Cet assistant affiche le résultat du calcul des formules de Coulomb extraites des Techniques de l'ingénieur ; Construction ; C242 ; « Ouvrages de soutènement, poussée et butée » rédigé par F. Schlosser [2] :

$$k_{a\gamma,\delta} = \frac{\cos^2(\lambda - \phi)}{\cos(\lambda + \delta)\left[1 + \sqrt{\dfrac{\sin(\phi + \delta) * \sin(\phi - \beta)}{\cos(\lambda + \delta) * \cos(\lambda - \beta)}}\right]^2}$$

$$k_{p\gamma,\delta} = \frac{\cos^2(\lambda + \phi)}{\cos(\lambda + \delta)\left[1 - \sqrt{\dfrac{\sin(\phi - \delta) * \sin(\phi + \beta)}{\cos(\lambda + \delta) * \cos(\lambda - \beta)}}\right]^2}$$

avec :
- φ : l'angle de frottement (°) ;
- β : l'inclinaison de la surface libre par rapport à l'horizontale (°) ;
- λ : l'angle de l'écran avec la verticale (par défaut 0) (°) ;
- δ/φ : le rapport de l'obliquité des contraintes sur l'angle de frottement.

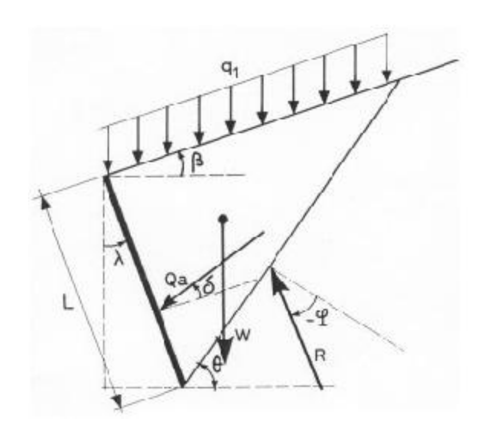


Figure C 38 : Données pour la formule de Coulomb

Les coefficients $k_{a\gamma,\delta}$ et $k_{p\gamma,\delta}$ correspondent aux valeurs des coefficients de poussée et butée inclinées de δ_a et δ_p. L'assistant fournit ensuite les valeurs $k_{a\gamma}$ et $k_{p\gamma}$ des coefficients de poussée et butée horizontales.



- <u>Assistant « Poussée et butée des terres selon la formule de Rankine »</u>

  Cet assistant est disponible sous 2 formes différentes :

  - L'assistant Rankine simplifié correspondant au bouton « Rankine » sur la boîte de dialogue principale de saisie des caractéristiques des sols : cet assistant calcule les valeurs de $k_{a\gamma}$ et $k_{p\gamma}$ par la formule de Rankine <u>avec une surface libre horizontale</u> et transfère automatiquement les valeurs dans la case correspondante telle que :

    $$k_{a\gamma} = \tan^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right) \text{ et } k_{p\gamma} = \tan^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right).$$

    avec :
    - φ : l'angle de frottement (°).

  - L'assistant Rankine permettant de prendre en compte l'inclinaison du talus, accessible par le bouton « kaγ/kpγ » sur la boîte de dialogue principale de saisie des caractéristiques des sols, puis le choix « Rankine » : cet assistant affiche le résultat des formules de Rankine pour un mur de soutènement <u>avec un talus incliné</u> en tête extraites des Techniques de l'ingénieur ; Construction ; C242 ; « Ouvrages de soutènement, poussée et butée » rédigé par F. Schlosser [2] et rappelées ci-dessous :

    $$k_{a\gamma} = \left[\frac{\cos\beta - \sqrt{\cos^2\beta - \cos^2\varphi}}{\cos\beta + \sqrt{\cos^2\beta - \cos^2\varphi}}\right]\cos\beta$$

    $$k_{p\gamma} = \left[\frac{\cos\beta + \sqrt{\cos^2\beta - \cos^2\varphi}}{\cos\beta - \sqrt{\cos^2\beta - \cos^2\varphi}}\right]\cos\beta$$

    avec :
    - φ : l'angle de frottement (°) ;
    - β : l'inclinaison de la surface libre par rapport à l'horizontale (°).

C.4.1.4. Les coefficients k_{ac} et k_{pc}

$$k_{ac} = \frac{1}{\tan\varphi}\left[\frac{\cos\delta_a - \sin\varphi\cos\alpha}{1+\sin\varphi}e^{-(\alpha-\delta_a)\tan\varphi}\cos\delta_a - 1\right] \text{ et}$$

$$k_{pc} = \frac{1}{\tan\varphi}\left[\frac{\cos\delta_p + \sin\varphi\cos\alpha}{1-\sin\varphi}e^{(\alpha+\delta_p)\tan\varphi}\cos\delta_p - 1\right] \text{ avec } \sin\alpha = \frac{\sin\delta}{\sin\varphi}$$

C.4.1.5. Le coefficient k_h

3 assistants sont proposés dans K-Réa pour la détermination du coefficient de réaction k_h.

C.4.1.5.1. <u>La formule de Balay</u>

La formule de Balay [4] repose sur la formule suivante :

$$k_h = \frac{E_m}{\left(\frac{\alpha.a}{2}\right) + 0.133 * (9.a)^{\alpha}}$$

avec :

- E_m : module pressiométrique (kN/m^2 ou KsF) ;
- α : paramètre rhéologique (voir aussi le chapitre B.3.2.4) ;
- a : paramètre dimensionnel (m) (cf Figure C 39, voir aussi le chapitre B.3.2.4).

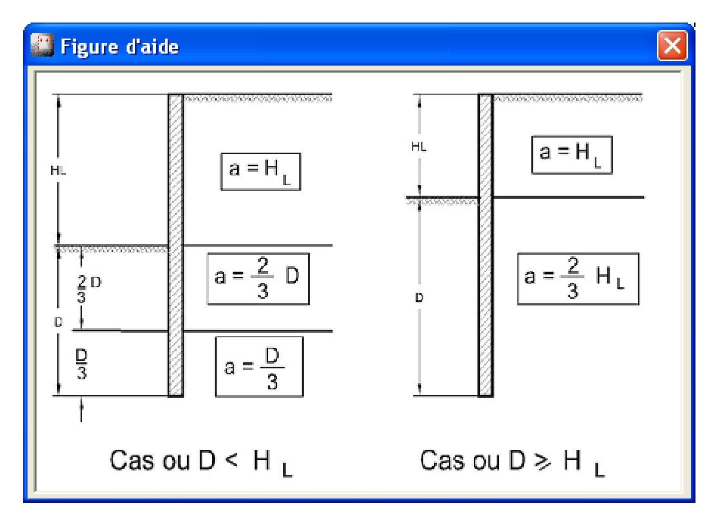


Figure C 39 : Paramètre a pour la formule de Balay

C.4.1.5.2. La formule de Schmitt

La méthode de calcul de Schmitt [5] repose sur la formule suivante :

$$k_h = \frac{2{,}1.\left(\frac{E_m}{\alpha}\right)^{\frac{4}{3}}}{(EI)^{\frac{1}{3}}}$$

avec :

- E_m : module pressiométrique (kN/m^2 ou KsF) ;
- α : paramètre rhéologique (voir aussi le chapitre B.3.2.4).

C.4.1.5.3. Les abaques de Chadeisson

Les abaques de Chadeisson [6] fournissent la valeur de k_h en fonction de l'angle de friction du sol et de sa cohésion.

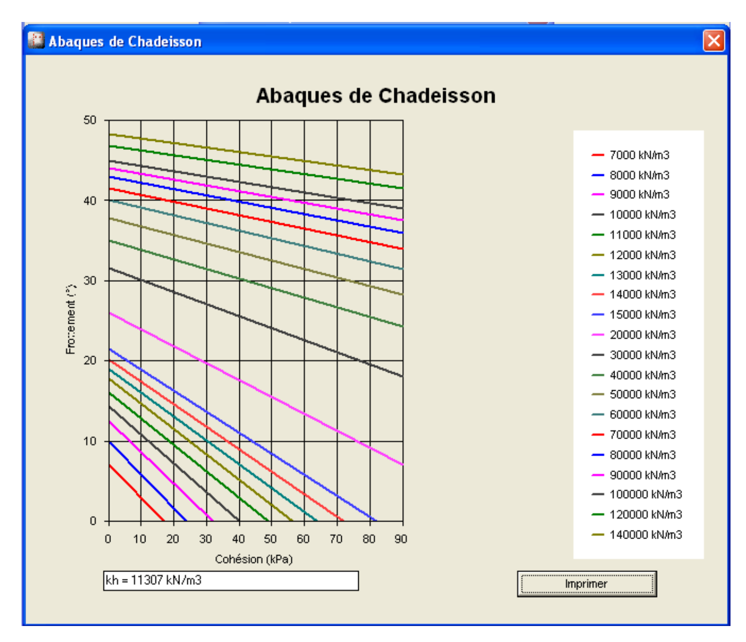


Figure C 40 : Abaques de Chadeisson



C.4.2. Assistants relatifs aux caractéristiques de l'écran (cf chapitre B.3.3)

C.4.2.1. Produit d'inertie et rigidité cylindrique d'une paroi continue

Cet assistant de K-Réa propose le calcul du produit d'inertie EI par ml (ou par Ft) d'une paroi continue par la formule suivante :

$$EI = E \; * \frac{1 * e^3}{12}$$

Avec :

- **E** : le module d'Young du béton (à saisir directement ou à choisir dans la liste déroulante contiguë (kN/m², KsF) ;
- **e** : l'épaisseur de l'écran (m, Ft).

Dans le cas où l'écran a été défini comme cylindrique, ce même assistant propose également le calcul de la rigidité cylindrique Rc par la formule suivante :

$$R_c = \frac{E \times e}{r^2}$$

Avec :

- **r** : le rayon de l'enceinte cylindrique (m, Ft).

C.4.2.2. Paroi composite

Cet assistant propose le calcul du produit d'inertie EI par mètre linéaire (ou par Ft) d'une paroi composite composée de pieux et d'un parement entre les pieux :

$$EI_{paroi\,composite} = EI_{pieux} + EI_{parement}$$

L'assistant permet la prise en compte de différents types de pieux. Le calcul du produit EI équivalent des pieux par mètre linéaire (ou par Ft) est détaillé dans les sous-chapitres suivants.

Le produit d'inertie EI du parement par ml (ou par Ft) est calculé comme suit :

$$EI_{parement} = E * \frac{1 * e^3}{12}$$

avec :

- **E** : module d'Young du parement (kN/m², KsF) ;
- **e** : épaisseur de l'écran (en m, Ft).

C.4.2.2.1. <u>Pieux circulaires de section pleine</u>

Le produit d'inertie EI des pieux par ml (ou par Ft) est calculé comme suit :

$$EI_{pieux} = \frac{E \times I}{eh} \text{ avec } I = \frac{4\pi \times d^4}{64}$$

avec :

- **E** : module d'Young du pieu (kN/m², KsF) ;
- **eh** : entraxe entre les pieux (m, Ft) ;
- **d** : diamètre de chaque pieu (en m, Ft).

C.4.2.2.2. Profilés métalliques

Le produit d'inertie EI des pieux (profilés) par ml (ou par Ft) est calculé comme suit :

$$EI_{pieux} = \frac{I_{profilé}}{e_h} E_{acier}$$

avec :

- $\mathbf{I_{profilé}}$: l'inertie du profilé sélectionné (m^4) ;
- $\mathbf{E_{acier}}$: module d'Young de l'acier (kN/m^2, KsF) ;
- $\mathbf{e_h}$: entraxe entre les profilés (m, Ft).

C.4.2.2.3. Pieux mixtes

La sélection de l'assistant "pieux mixtes" permet la prise en compte pour le calcul du produit EI à la fois du profilé et de la section pleine autour du profilé.
Le produit d'inertie EI des pieux mixtes par ml (ou par Ft) est calculé comme suit :

$$EI_{pieux} = \frac{\pi d^4}{64 e_h} E_{béton} + \frac{I_{profilé}}{e_h} E_{acier} - \frac{I_{profilé}}{e_h} E_{béton}$$

avec :

- $\mathbf{E_{béton}}$: module d'Young du pieu (kN/m^2, KsF) ;
- $\mathbf{e_h}$: entraxe entre les pieux (m, Ft) ;
- **d** : diamètre de chaque pieu (saisi en m, Ft) ;
- $\mathbf{I_{profilé}}$: l'inertie du profilé sélectionné (m^4) ;
- $\mathbf{E_{acier}}$: module d'Young de l'acier (kN/m^2, KsF) ;

Pour la partie « pieu », cette formule peut s'appliquer à plusieurs types de géométrie :

Figure C 41 : Configurations de pieux mixtes



C.4.3. Paramètres définis en cours de phasage (cf chapitre B.4.4)

C.4.3.1. L’action « Poussée réduite »

Cette action nécessite la définition des paramètres R et C, avec :

- R : largeur d’emprise de l’élément de soutènement / entraxe entre 2 éléments consécutifs
- C : largeur efficace de butée de l’élément de soutènement / largeur d’emprise de l’élément de soutènement

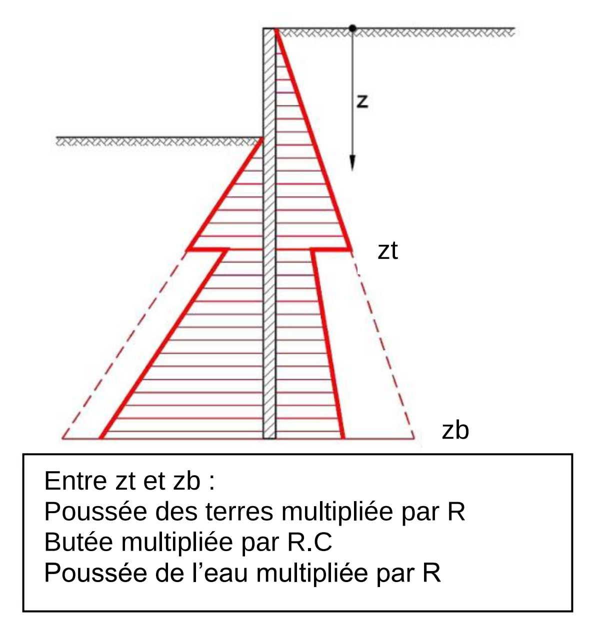


Figure C 42 : Définition de la poussée réduite

Il va de soi que le produit des deux coefficients R.C ne peut dépasser 1 (100% de la largeur du mur considéré).

<u>Exemple d’application pour un projet de paroi combinée :</u>

Considérons une paroi combinée HZM 1080 B - s.24 / AZ 18-700 (cf figure ci-dessous) avec :

- largeur du système = 2.40 m
- largeur d'emprise de l’élément principal = 1.00 m.

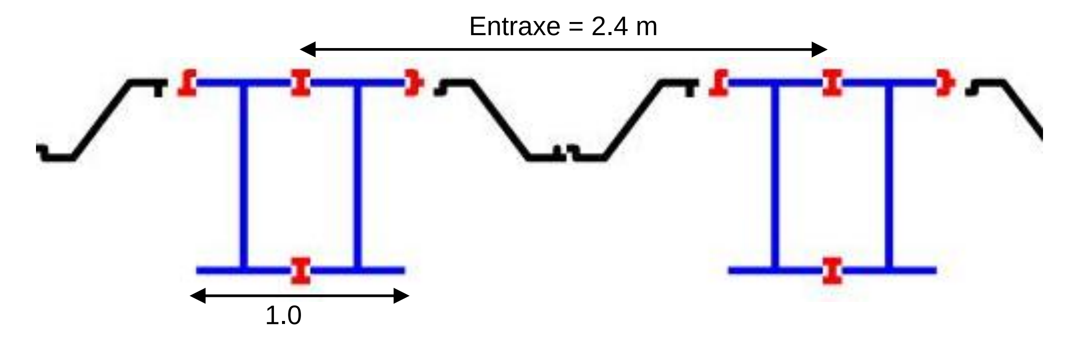


Figure C 43 : Exemple de paroi combinée HZM

Il y a 2 modes de définition possibles pour l'écran dans ce cas :

1. Soit on la définit en tant que paroi combinée dans K-Réa. Dans ce cas, ce sont les propriétés moyennes du système qui sont prises en compte, et il n'y a donc pas lieu d'utiliser la poussée réduite : le soutènement est supposé continu par définition, et c'est bien la totalité des efforts de soutènement qui sont repris par le système équivalent.

2. Soit on ne définit pour le soutènement que les éléments principaux (pieux HZ), avec leurs propres caractéristiques. Dans ce cas, on ne dimensionne effectivement que ces pieux, et le soutènement est supposé discontinu (on néglige les éléments intermédiaires dans le dimensionnement). Il convient alors de considérer une action poussée réduite avec :

    - R = 1.0 / 2.4 = 0.42 : cela revient à considérer que 42 % de la poussée seulement est reprise par les pieux (les 58% restants sont supposés passer « au travers » du soutènement sans affecter l'équilibre).
    - C = 2 : en effet, on admet cependant généralement que la butée peut être améliorée. Par exemple, on peut admettre que devant le pieu HZ de 1 m de large, la largeur de mobilisation de la butée est égale à 2 fois l'emprise, soit 2 m (en prenant par exemple le frottement en plus de la butée frontale), auquel cas le coefficient multiplicateur C vaut 2.

C.4.3.2. Les actions « Surcharge de Boussinesq » et « Surcharge de Graux »

Les surcharges de types Boussinesq et Graux correspondent toutes les deux à des surcharges verticales localisées s'appliquant sur une largeur limitée sur le sol ou en profondeur.

Pour chaque surcharge, on calcule le supplément de contrainte verticale $\Delta\sigma_v$ engendré en profondeur au droit de l'écran (voir figure ci-dessous), qui est ensuite ajouté directement aux contraintes du sol du côté de l'application de la surcharge. Le supplément de contraintes horizontales $\Delta\sigma_h$ appliqué sur l'écran est alors égal à :

$$\Delta\sigma_h = k.\Delta\sigma_v$$

Avec $k = k_a$, k_p ou k_0 suivant l'état du sol.

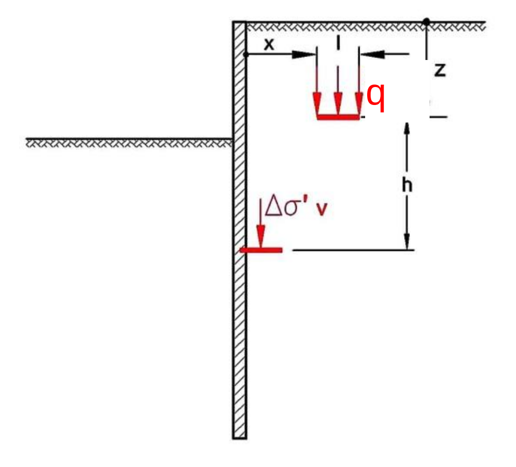


Figure C 44 : Evaluation du supplément de contraintes verticales au droit de l'écran



Le supplément de contrainte $\Delta\sigma_v$ engendré dépend du mode de diffusion de la surcharge.

- Surcharge de Boussinesq : la diffusion est basée sur l'intégration du profil de contraintes issu du modèle de Boussinesq. Avec les notations de la figure ci-dessus, l'expression de $\Delta\sigma_v$ engendré à une profondeur « h » sous la surcharge est donnée par la relation (Terzaghi, 1943):

$$\Delta\sigma_v = \frac{2S}{\pi}\left(\text{atg}\left(\frac{hl}{x(x+l)+h^2}\right)+\frac{xh}{x^2+h^2}-\frac{(x+l)h}{(x+l)^2+h^2}\right)$$

- Surcharge de Graux : la diffusion se fait selon un fuseau trapézoïdal dans chaque couche en admettant un niveau de contrainte uniforme à une profondeur donnée. La direction du fuseau de diffusion est fonction de l'angle de frottement des couches traversées comme le précise la figure ci-après.

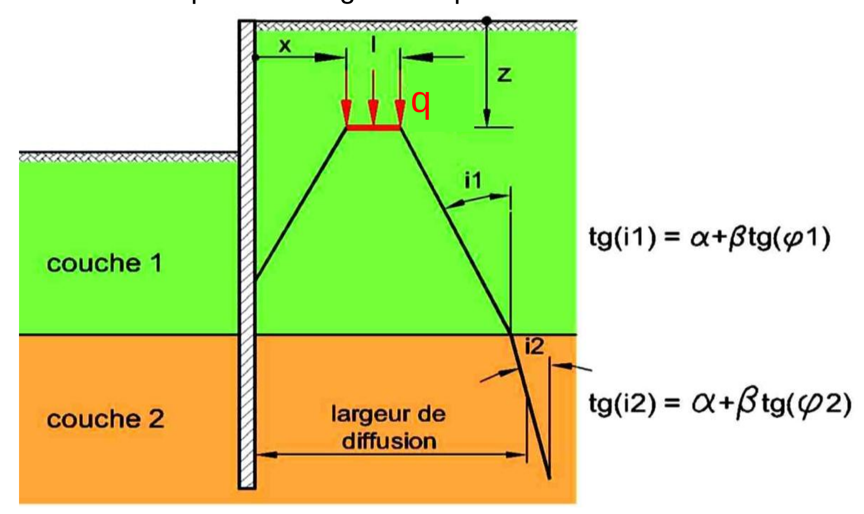


Figure C 45 : Principe de diffusion des contraintes verticales sous une surcharge de Graux

C.4.3.3. L'action « Remblaiement »

L'action « Remblaiement » nécessite la définition du coefficient k_i de poussée des terres à la mise en place du remblai : la pression des terres sur l'écran due à la mise en place du remblai est égale à la pression initiale soit $p_i = k_i.\sigma_v^{'}$ avec $k_{ay} \le k_i \le 1$.

Ce coefficient k_i peut prendre plusieurs valeurs :

- $k_i = k_0$, si l'on souhaite mettre l'état initial de poussée des terres du remblai à celui des terres au repos;
- $k_i > k_0$, si l'on souhaite exprimer un compactage de ces terres constituant le remblai;
- $k_i = k_{a\gamma}$, si l'on souhaite mettre l'état initial de poussée des terres du remblai à celui de poussée active.

<u>Remarque sur la prise en compte du remblai :</u> le remblai reposant directement sur le fond de fouille, les contraintes verticales sous le remblai se trouvent modifiées de l'accroissement de contraintes verticales dû au poids des terres du remblai.

C.4.3.4. L'action « Risberme »

La risberme, dans son action sur l'écran, est modélisée comme une succession de surcharges négatives semi infinies correspondant aux tranches horizontales de sol comprises entre l'infini et l'enveloppe extérieure de la risberme entre le niveau haut : **z de l'excavation précédente** et le niveau bas : **z du pied de la risberme**. L'action résultante est une diminution de la contrainte verticale effective sous la risberme devant l'écran suivant la formule :

$$\Delta\sigma'_v(z) = \sum \frac{2}{\pi}\left[\arctan\left[\frac{|u-z|}{x}\right] + \frac{x|u-z|}{x^2 + |u-z|}\right]\gamma du$$

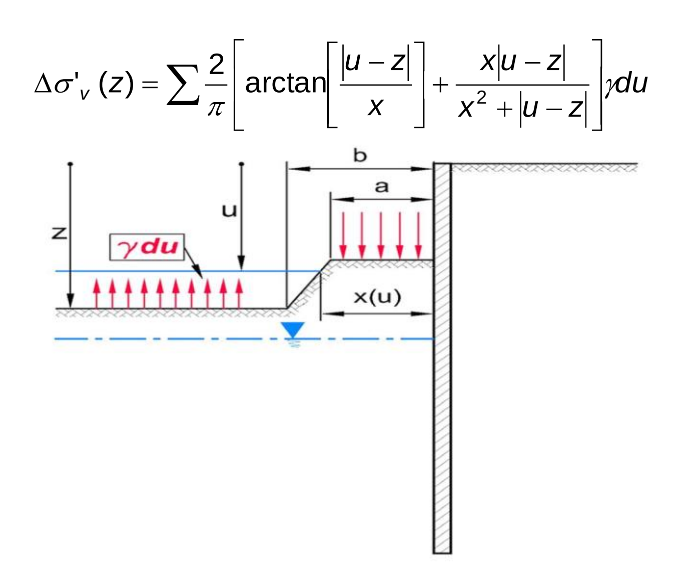


Figure C 46 : Mode de prise en compte de l'action risberme

avec :

- **z** : niveau de la base de la risberme (m ou Ft) ;
- **u** : niveau à partir du haut de l'écran (m ou Ft) ;
- **x(u)** : distance à l'écran pour le niveau u (m ou Ft) ;
- **a** : la largeur du toit de la risberme > 0 (m ou Ft) ;
- **b** : la largeur du pied de la risberme >0 (m ou Ft).

L'attention de l'utilisateur est attirée sur le caractère très simplifié de l'approche décrite ci-dessus qui peut conduire dans certains cas à des résultats exagérément optimistes. De plus, l'application de cette approche est incompatible avec les recommandations de l'Eurocode 7 qui préconise le calage des pressions limites de butée/poussée à l'interface Ecran/Risberme par recours à des approches plus élaborées de type « calcul à la rupture ».

A titre indicatif, la norme NF P 94–282 propose, à défaut d'un calcul à la rupture spécifique, une approche intermédiaire consistant à caler le coefficient de butée à prendre en compte dans la couche représentative de la risberme en écrivant l'égalité entre la butée résultante sur la hauteur de la risberme et le cisaillement résultant disponible à la base de la risberme (voir Figure C 47) :

$$B_{max} = W\tan(\varphi') + c' L_r$$

Cela revient à supposer implicitement que le mécanisme de rupture par butée se développe préférentiellement à la base de la risberme.



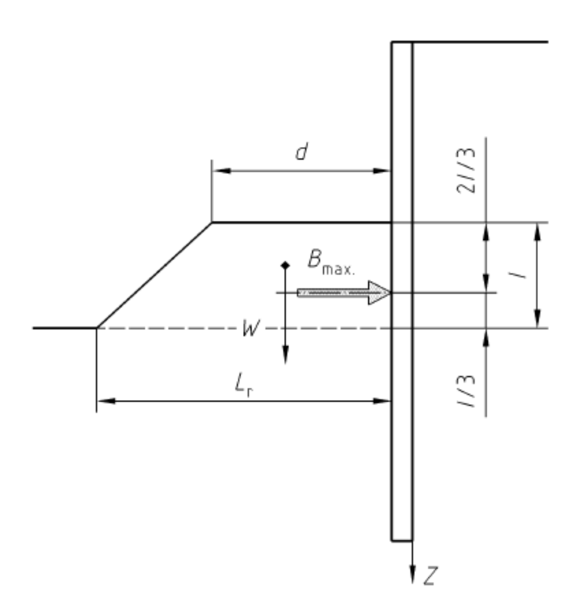


Figure C 47 : Approche intermédiaire proposée par la norme NF P 94-282 pour la prise en compte d'une risberme

D'autre part, on rappelle ici que K-Réa n'effectue pas de calcul de stabilité sur la géométrie de la risberme. Ce calcul devra être effectué par ailleurs. Il est de la responsabilité de l'utilisateur.

C.4.3.5. L'action « Butons » - Assistant calcul de raideur

L'onglet Assistant de l'action « Butons » permet d'accéder à l'**Assistant calcul raideur**.
Cet assistant permet le calcul de la raideur K du buton à partir de la formule suivante :

$$K = \frac{EA}{l_u} . \frac{1}{e_h}$$

Avec :

- E = module d'Young du matériau (kN/m^2 ou KsF) ;
- A = section (mm^2 ou In^2) ;
- l_u = longueur utile (m ou Ft) ;
- e_h = espacement horizontal (m ou Ft).

C.4.3.6. L'action « Tirants » - Assistant précontrainte et calcul raideur

L'onglet Assistant de l'action « Tirants » permet d'accéder à l'**Assistant précontrainte et calcul raideur**. Cet assistant permet le calcul de la précontrainte du tirant et de sa raideur à partir des formules suivantes :

- Précontrainte du tirant :

$$P = \frac{P}{e_h}$$

Avec :

- e_h = espacement horizontal (m ou Ft)



- Raideur du tirant :

$$K = \frac{EA}{l_u} . \frac{1}{e_h}$$

Avec :
  - E = module d'Young du matériau (kN/m^2 ou KsF) ;
  - A = section (mm^2 ou In^2) ;
  - l_u = longueur utile (m ou Ft) ;
  - e_h = espacement horizontal (m ou Ft).

C.4.3.7. L'action « Ancrage de liaison » - Assistant

L'onglet Assistant de l'action « Ancrage de liaison » permet d'accéder à l'**Assistant : Ancrage de liaison**, qui permet le calcul de la raideur de l'ancrage selon la formule suivante :

$$K = \frac{ES}{l_u} . \frac{1}{e_h}$$

Avec :
- E = module d'Young du matériau (kN/m^2 ou KsF) ;
- A = section (mm^2 ou In^2) ;
- l_u = longueur utile (m ou Ft), égale à la distance entre les 2 écrans dans le cas d'un ancrage horizontal ;
- e_h = espacement horizontal (m ou Ft).

C.4.3.8. L'action « Gradient hydraulique »

Cette commande permet de corriger les courbes de pressions d'eau tenant compte soit d'un gradient hydraulique associé au régime d'écoulement accompagnant un rabattement de nappe, soit de la présence de passages imperméables ou de nappes perchées dans les différentes couches.

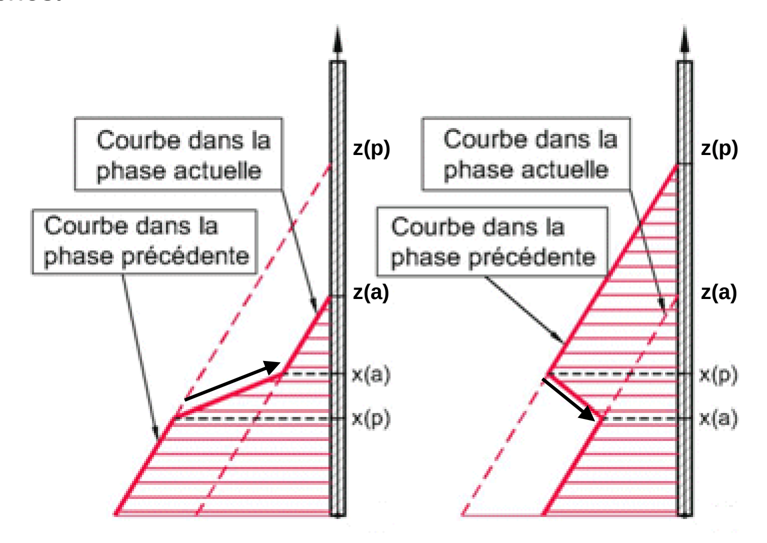


Figure C 48 : Définition de gradient hydraulique avec raccordement ascendant ou descendant (en cotes)



Cette action permet ainsi de constituer un nouveau diagramme de pression hydraulique sur l'écran avec un gradient égal à $\frac{u(\text{imposé})}{u(\text{hydrostatique})} - 1$. u(imposé) correspond sur la figure ci-dessus à la courbe de pression définie pour la phase actuelle.

Cette action a également un effet sur le calcul de la contrainte verticale effective :

$$\sigma'_{v} = \sigma'_{v0} - \left[u(imposé) - u(hydrostatique)\right]$$

Un exemple de définition des paramètres de cette action est donné dans le chapitre B, et un exemple complet d'application est fourni dans le manuel D (tutoriel 2).

BIBLIOGRAPHIE

[1] J. Kérisel et E. Absi. Tables de poussée et de butée des terres. Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussée, dernière parution 2003.

[2] F. Schlosser. Ouvrages de soutènement, poussée et butée. Techniques de l'ingénieur ; Construction ; C242.

[3] F. Schlosser. Ouvrages de soutènement - Techniques de l'Ingénieur – Traité de construction ; C244

[4] J. Balay. Recommandations pour le choix des paramètres de calcul des écrans de soutènement par la méthode aux modules de réaction. Note d'information technique, LCPC, 1984.

[5] P. Schmitt. Méthode empirique d'évaluation du coefficient de réaction du sol vis-à-vis des ouvrages de soutènement souple. Revue Française de Géotechnique n° 71, 2ème trimestre 1995.

[6] A. Monnet. Module de réaction, coefficient de décompression, au sujet des paramètres utilisés dans la méthode de calcul élasto-plastique des soutènements. Revue Française de Géotechnique n° 65, 1er trimestre 1994.

[7] Fascicule 62. LCPC-SETRA.

[8] Catalogue des palplanches Arcelor Mittal.

[9] Eurocode 7 NF EN 1997 – 1 de Juin 2005

[10] Calcul Géotechnique – Ouvrages de soutènement - Norme française NF P 94-282 – AFNOR – Mars 2009

[11] Terzaghi K., Evaluation of coefficients of subgrade reaction, 1955

[12] Simpson B., Embedded retaining walls - Guidance for economic design, CIRIA Report C580

[13] Smoltczyk U., Geotechnical engineering handbook, Ernst&Sohn, 2003

[14] Clayton C.R.I., Retaining structures, Institution of Civil Engineers, 1992

[15] EAB, Recommendations on excavations, Ernst&Sohn, 2009

[16] EAU, Recommendations of the committee for waterfront structures harbors and waterways, Ernst&Sohn, 2004